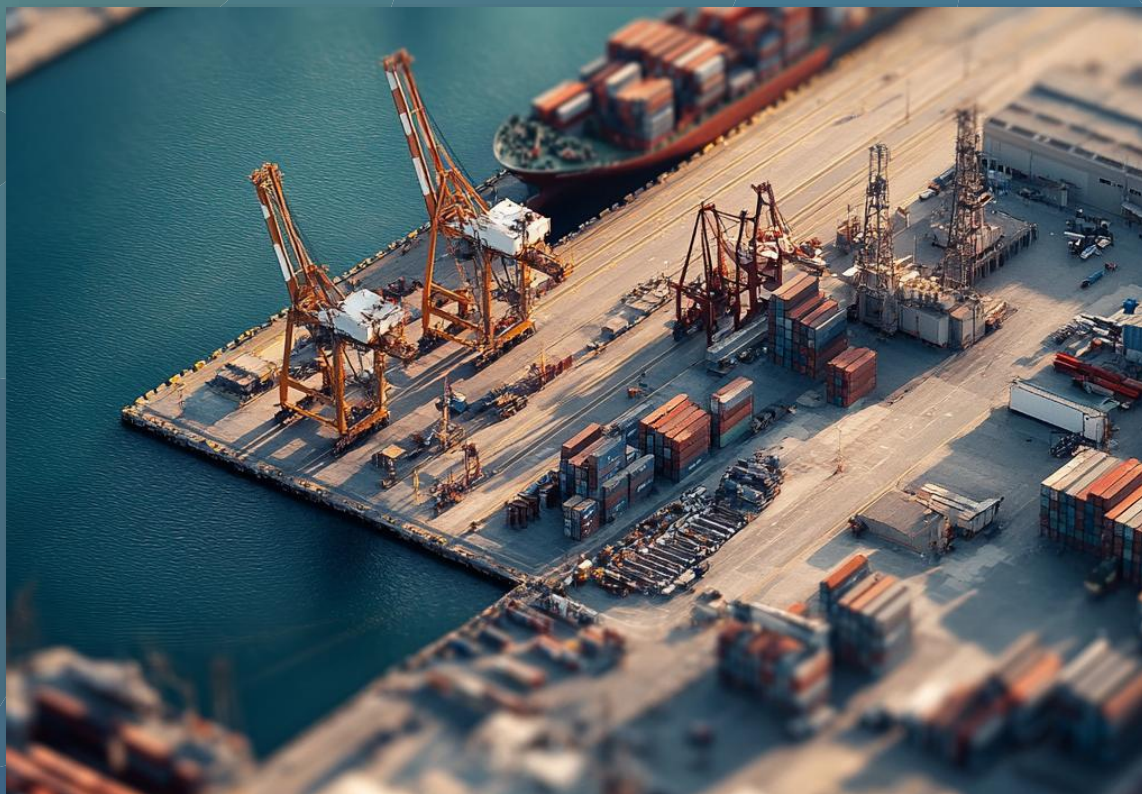


Département Aménagement et Environnement, 4^{ème} année
**Eye-PI : Données et modèles pour la
décarbonation du maritime**



Rapport de stage individuel

Tuteur entreprise :

Jean-François Sigrist
Ingénieur, docteur en sciences de l'ingénieur
et habilité à diriger les recherches

Tuteur académique :

Marina Vinot

Entreprise d'accueil :

Eye-PI - 4, place Foire le Roi 37000 TOURS

Léo Leprêtre

UIT

2024-2025

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier mon maître de stage, Monsieur Jean-François Sigrist, de m'avoir accueilli comme stagiaire dans son entreprise, formé et accompagné tout au long de mon stage. Il m'a beaucoup appris sur le monde de la recherche scientifique et du maritime qui m'était complètement inconnu. Plus précisément, son encadrement continu, ses consignes claires et ses conseils étaient propices à un environnement de travail optimal.

Je souhaite par ailleurs remercier Saiful Anuar Shamsuddin, également stagiaire chez eye-PI, pour sa gentillesse et son aide dans mon travail.

Table des matières

Introduction sur la décarbonation du maritime	4
Poids du secteur maritime dans les émissions mondiales de gaz à effet de serre	4
Méthodes de calcul des émissions du maritime	5
Les réglementations	6
Solutions de décarbonation	7
Contexte de la mission	10
L'institut MEET2050	10
CAP2050	11
Eye-PI	12
Contenu du stage	13
Phase d'introduction au domaine maritime	13
Base de données technologies	15
Base de données flotte	18
Données brutes	18
Compilation des données et statistiques	19
Base de données énergie	21
Facteurs d'émission	21
Coûts	23
Caractéristiques	23
Intégration de données d'Eifer	23
Base de données divers	24
Base de données bibliographique	25
Modélisation de trajectoires de décarbonation	26
Génération de paramètres aléatoires	26
Conception de l'algorithme	27
Retour d'expérience	29
Conclusion	30
Bibliographie	31

Introduction sur la décarbonation du maritime

Poids du secteur maritime dans les émissions mondiales de gaz à effet de serre

Aujourd'hui, le secteur maritime est l'un des modes de transport les moins émissifs en matière de CO₂ comparé aux autres, comme le transport routier ou aérien. En effet, si on s'intéresse aux émissions rapportées au nombre de tonnes transportées et de kilomètres parcourus, le poids de celles-ci est nettement inférieur pour le maritime avec 5 g/t/km contre 147 g/t/km pour le fret urbain et 512 g/t/km pour l'aérien (figure 1). Cependant, en raison du gigantisme de ce secteur, les émissions absolues liées au transport maritime sont loin d'être négligeables et représentent en 2019 environ 3% à 4% des émissions anthropiques mondiales, soit 1 076 Mt CO₂e (Sigrist *et al.*, 2023). Ces émissions sont en augmentation de 10% par rapport à 2012 en raison de l'augmentation du trafic et des quantités transportées, prenant le dessus sur la baisse des émissions unitaires par navire qu'il est possible d'observer. En effet, selon le Forum international des transports, les quantités transportées du maritime devraient passer de 75 000 Gt.km en 2015, à 117 000 Gt.km en 2030 et à plus de 260 000 Gt.km en 2050. D'autres facteurs participent à ces importantes émissions de gaz à effet de serre (GES) comme avec d'une part l'utilisation de carburants très carbonés comme le Heavy Fuel Oil (HFO) ou le Marine Gasoil (MDO). D'autre part, il est essentiel de noter la présence significative d'émissions autres que de CO₂ comme les oxydes de soufre (SOx), les oxydes d'azote (NOx) ou les particules fines. Par ailleurs, il est souvent évoqué que si le transport maritime était un pays, il serait le 6^{ème} émetteur mondial derrière le Japon, la Russie, l'Inde, les États-Unis et la Chine.

Transport	Émissions et consommation	
Maritime	5 g/t/km	160 kJ/t.km
Ferroviaire	16 g/t/km	205 kJ/t.km
Fluvial	34 g/t/km	-
Routier	67 g/t/km	2426 kJ/t.km
Fret urbain	147 g/t/km	-
Aérien	512 g/t/km	6900 kJ/t.km

Figure 1 Émissions unitaires comparées de différents modes de transport (source : Damgé, 2022, Forum International des Transports, 2021, Sigrist *et al.*, 2023)

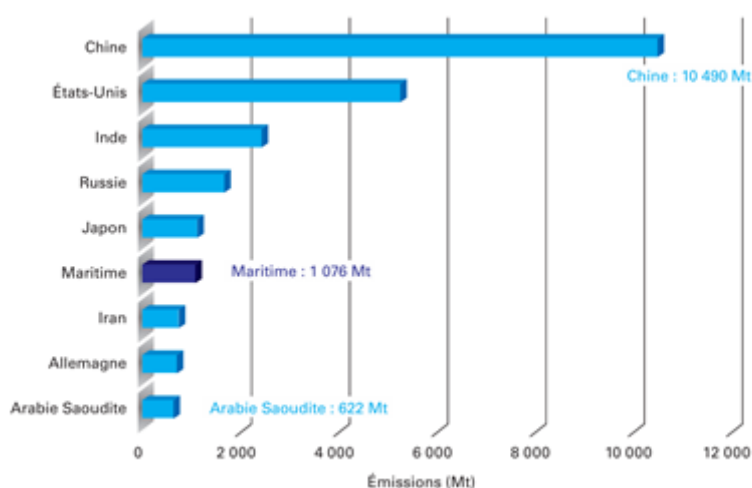


Figure 2 Émissions comparées du maritime et des huit pays les plus émetteurs en 2018 (source : Our World in Data)

Méthodes de calcul des émissions du maritime

Il existe actuellement diverses méthodes de comptabilisation des émissions dans le domaine maritime. En fonction des systèmes de comptabilisation, les périmètres de navires, géographiques et des émissions varient. Tout d'abord, au niveau mondial, les données sont issues des rapports de l'Organisation Maritime Internationale (OMI) et concernent l'ensemble des types de navires : transport de marchandises et de passagers, pêche, transport domestique et international. Pour enrichir ces données, le *Data Collecting System* (DCS) trace les émissions des navires de plus de 5000 tonnes de jauge brute (tjb), lesquels représentent plus de 90% des capacités du transport mondial.

Ensuite, le système européen se nommant *Monitoring – Reporting – Verifying* (MRV) concerne le même périmètre de navires que l'OMI dès lors que le trajet est effectué à partir ou vers un port européen. Les armateurs soumis au système MRV doivent suivre leurs émissions de CO₂ et également leurs consommations de carburants et des paramètres liés au calcul de l'efficacité énergétique.

Pour la France, les données SECTEN (SECTeurs économiques et Énergies) sont fournies dans des rapports de synthèses des émissions au niveau national. La couverture des données comprend le transport maritime domestique dont la pêche, le transport domestique fluvial et les autres navigations (Sigrist *et al.*, 2023). Ce système distingue deux types d'émissions : les émissions internationales (depuis ou vers un port français) et les émissions domestiques (entre deux ports français). Les émissions liées aux activités internationales des armateurs français ne sont pas considérées dans les émissions nationales. De plus, si le soutage est réalisé ailleurs qu'en France, les émissions ne sont pas considérées, même si le navire voyage en France. Ces deux aspects tendent alors à sous-estimer le décompte national (Sigrist *et al.*, 2023).

	 Système DCS (Data Collecting System)	 Système MRV (Monitoring – Reporting – Verifying)	 Données SECTEN (SECTeurs économiques et Énergies)
Cadre juridique	Amendement adopté au MEPC 70 d'octobre 2016, entré en vigueur en 2018	Règlement 2015/757	Protocole de Kyoto
Mise en œuvre	2019	2019	1990
Périmètre navires	Navires dont la jauge brute est supérieure à 5 000 tjb	Navires dont la jauge brute est supérieure à 5 000 tjb	Tout navire, soit : – transport domestique fluvial – transport domestique dont la pêche – autres navigations dont la plaisance
Périmètre géographique	Toute zone géographique	– 100 % du transport intra-européen – 100 % du transport international entre un port européen et un port non européen	Tous les trajets
Nombre de navires concernés	– 85 % des émissions du transport maritime international – 33 000 navires	12 000 navires	Comprend les émissions effectuées lors de voyages à partir des ports français par les navires indépendamment de leur destination (domestique ou internationale) et de leur pavillon

Tableau 1 Méthodes de comptabilisation des émissions de l'OMI, de l'UE et de la France (source : 4^{ème} étude OMI sur les émissions de GES 2020 ; 2nd rapport annuel MRV pour le transport maritime couvrant les émissions 2019 ; rapport SECTEN 2022)

Les réglementations

Le secteur maritime est vital pour l'économie mondiale en raison de la taille colossale du trafic. En effet, il représente 80% des valeurs marchandes mondiales et 90% des volumes transportés. Cela est particulièrement visible lors d'événements tels que le blocage du canal de Suez pendant une semaine par le navire Ever Given en mars 2021, où le commerce mondial s'est retrouvé fortement perturbé. Il est donc nécessaire d'accélérer la transition du secteur dès aujourd'hui pour maintenir sa pérennité. C'est pourquoi les instances internationales telles que l'Union européenne ou l'OMI renforcent les réglementations et imposent des objectifs de plus en plus ambitieux.

Pour le moment, l'OMI vise une réduction des émissions unitaires de 40% d'ici 2030 et une neutralité carbone à l'horizon 2050. Pour cela, quatre dispositifs majeurs ont été créés par l'organisme : le *Ship Energy Efficiency Management Plan* (SEEMP), l'*Energy Efficiency Design ship Index* (EEDI), l'*Energy Efficiency eXisting ship Index* (EEXI) et le *Carbon Intensity Index* (CII). Le SEEMP est un outil de gestion à bord qui a pour but d'améliorer l'efficacité énergétique opérationnelle du navire pour mettre en place un processus d'amélioration continue chez les armateurs. L'EEDI et EEXI sont des normes de conception, le premier s'appliquant aux navires neufs et le second aux navires existants. Enfin, le CII, exprimé en gCO₂/tonne.kilomètre, est une norme opérationnelle qui vise à diminuer l'intensité carbone d'un navire. L'intensité carbone est définie par la quantité de CO₂ émise, rapportée à la quantité transportée et à la distance parcourue. En fonction de sa catégorie et de ses caractéristiques, des objectifs de réduction de CII sont imposés à chaque navire et une notation est obtenue en comparant le CII atteint au CII attendu.

De son côté, depuis 2024, L'UE a mis en place le système d'échange de quotas d'émissions (ETS) pour les navires faisant escale dans un port européen. Cette réglementation, impactant 100% des émissions des voyages intra-européens et 50% de ceux entre un port de l'UE et un port d'État tiers, impose des réductions plus importantes qu'avec l'objectif de l'OMI. Le système ETS va également agrandir son périmètre d'action étant donné que, dans un premier temps, seuls les navires de jauge supérieure à 5000 UMS (*Universal Measurement System*) transportant des marchandises ou des passagers sont concernés.

Autrement, dans l'optique de réduire l'intensité GES des carburants utilisés à bord des navires faisant escale au sein de l'UE, le règlement FuelEU Maritime vise à encourager l'adoption de carburants durables, avec la mise en place de cibles obligatoires d'intensité carbone décroissante de 2025 à 2050. Ces intensités carbonées ne concernent pas uniquement les émissions à bord du navire mais celles de l'ensemble du cycle de vie du carburant.

Finalement, comme pour l'OMI, l'UE présente un objectif global de neutralité carbone d'ici 2050.

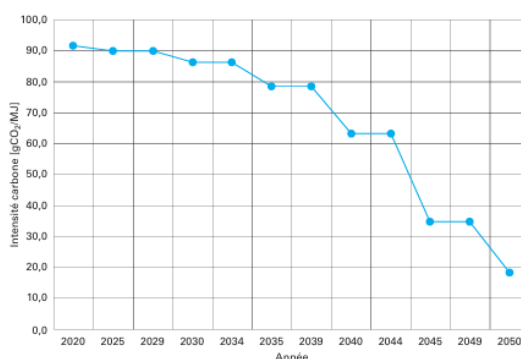


Figure 3 Réduction de l'intensité carbone WTW des carburants, imposée par FuelEU Maritime (source : Parlement européen)

Solutions de décarbonation

Pour atteindre les différentes réglementations que nous venons d'évoquer, il est nécessaire que l'ensemble des acteurs du maritime investissent pour réduire le bilan carbone des navires existants et de produire de nouveaux navires performants. Les enjeux de la décarbonation du maritime sont d'autant plus importants qu'étant actuellement le mode le plus efficient à la tonne-kilomètre transportée, un report modal pourrait s'observer à condition qu'il assume cette charge. Dans le cas contraire, les modes bien moins sobres pourraient être préférés pour des raisons économiques. De plus, la durée de vie d'un navire étant en moyenne de 25 ans, les navires construits aujourd'hui participeront à la réussite ou non de la neutralité carbone à l'horizon 2050.

Le secteur maritime doit donc se consacrer, dès maintenant et pleinement, à la recherche de solutions, à la fois technologiques, énergétiques et opérationnelles. En effet, il est possible de décomposer les émissions de CO₂ de manière à mettre en évidence le contenu CO₂ de l'énergie consommée (on parle alors de facteur d'émission du carburant), l'efficacité énergétique et la sobriété (figure 4).

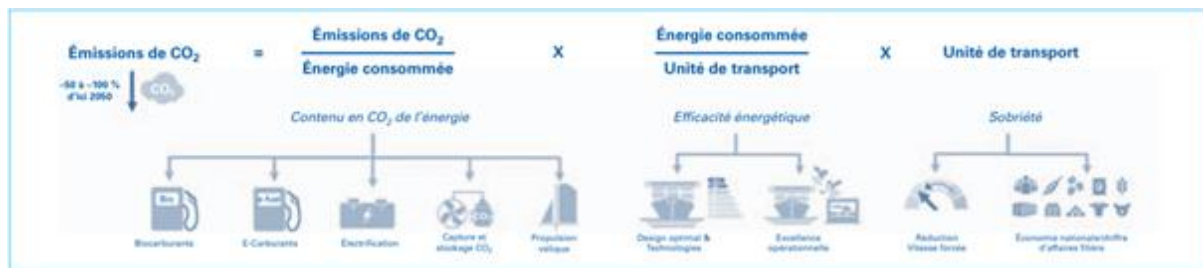


Figure 4 Les différentes catégories de leviers pour la décarbonation du maritime (Sigrist et al., 2023)

Premièrement, concernant le contenu CO₂ de l'énergie consommée et comme pour les autres modes de transport, de nombreux carburants alternatifs émergent afin de remplacer les carburants fossiles actuels. Pour commencer, le gaz naturel, économiquement viable et présentant des réductions de CO₂ de 20 à 30%, présente une quantité importante de méthane, avec un effet de réchauffement 86 fois plus fort que le CO₂. De leur côté, les biocarburants sont pour la majorité utilisés en drop-in fuel, c'est-à-dire en carburant d'appoint, mélangés avec un carburant fossile ayant des propriétés similaires, ce qui permet de minimiser l'altération du moteur existant. Les biocarburants sont produits à partir de la biomasse, soit à partir des cultures, soit des déchets. Ainsi, le carburant est considéré comme neutre en carbone car le CO₂ libéré lors de la combustion est celui qui est stocké par la biomasse durant sa croissance. Cependant, ces carburants posent d'autres problèmes comme la durabilité environnementale, la concurrence avec la production alimentaire et la pression exercée sur les ressources naturelles avec notamment la déforestation. Pour continuer, les carburants de synthèses (ou e-carburants) font également partie des options mises en avant. Les e-carburants sont produits à partir de deux éléments, l'hydrogène et le carbone (CO₂ capté dans l'air ou dans les fumées industrielles) ou l'azote (N₂), pour les carburants azotés comme l'ammoniac. Le principal obstacle à leur utilisation est leur coût bien plus élevé que les versions fossiles de ces mêmes carburants. Les émissions liées à leur production ne peuvent être nulles que si celle-ci est couverte par de l'électricité d'origine renouvelable (ou nucléaire). Une autre source de propulsion commençant sérieusement à se développer est le vélique, souvent utilisé comme système de propulsion auxiliaire en raison de l'intermittence du vent. Enfin, on retrouve l'électrification et l'hybridation, davantage du côté des petits navires et la propulsion nucléaire qui malgré ses avantages de densité énergétique, de prix et de très faibles émissions, est sujette à des barrières réglementaires, économiques et sociales (Balcombe et al., 2019).

Domaine	Description	Avantages	Limites
Énergie fossile faiblement carbonée	Le gaz naturel liquéfié (GNL) présente de nombreux avantages par rapport au fuel en termes de qualité de l'air, d'émissions de CO ₂ sous réserve de traiter correctement les fuites de méthane, avec un niveau de technologie adapté aux grands navires	- Amélioration de la qualité de l'air (SO_x, NO_x et particules) - Réduction des émissions de CO₂ jusqu'à 20 % sous réserve de réduire les fuites de méthane de la production à la combustion - Les navires à propulsion GNL pourront utiliser du biométhane et du e-méthane sans changement de technologie	- Nécessite un investissement technologique et humain pour maîtriser le combustible cryogénique à bord - Fuites de méthane qui doivent être réduites sur la chaîne de production et à la combustion sur le navire
Biofuels	Les biofuels et biogaz sont issus de la transformation de matières organiques et sont généralement utilisés en proportion limitée en mélange du carburant d'origine	- Solution de drop-in - Solution technologiquement disponible	- Stocks de matière organique limités - Production locale - Réglementation limitant les usages
e-fuels	Les e-fuels et e-gaz sont produits à partir d'électricité décarbonée et sont généralement utilisés en proportion limitée en mélange du carburant d'origine	- Solution de drop-in - Technologies de production matures pour des petites quantités	- Besoin important en électricité décarbonée - Faibles rendements énergétiques - Pas d'infrastructures de distribution en place (sauf pour le e-méthane) - Adaptation difficile des e-fuels à certains navires ou moteurs
Électrification et hybridation	Un usage d'électricité sous diverses formes (électrification à quai, batteries à bord de petits navires, hybridation de navires intermédiaires, peak shaving, etc.) permet d'optimiser l'efficacité énergétique globale du maritime	Solution en partie disponible pour des faibles puissances	- Poids et volume significatifs - Pas de solution actuellement pour des navires de forte puissance/ grande autonomie
Capture CO ₂	La capture de CO ₂ à bord des navires et sa redistribution à quai pour un usage terrestre (par exemple la production e-fuels) contribuent à réduire l'empreinte carbone des navires	Possibilité de retrofit de navires existants	- Limité par le volume de CO₂ capté, même liquéfié - Encombrement à bord - Logistique complexe à mettre en place
Propulsion par le vent	L'utilisation du vent comme moyen de propulsion est un mode d'assistance à la propulsion, voire de propulsion principale à part entière, et permet une réduction de la consommation (et des émissions)	Utilisation d'une énergie 100 % verte, disponible autour du navire, à coût nul	- Intégration parfois complexe à bord de certains navires - Ressource intermittente ou aléatoire (même si le recours au routage permet de limiter l'effet des fluctuations)

Tableau 2 Principales solutions d'énergie décarbonée (Sigrist et al., 2023)

Deuxièmement, l'efficacité énergétique va prendre en compte à la fois les diverses technologies propres au navire et des améliorations de l'ordre de l'opérationnel dans le but de réduire la consommation et, par conséquent, les émissions. La première catégorie va regrouper des mesures relatives aux différentes parties du navire (forme et revêtement de la coque, optimisation du gouvernail, du bulbe d'étrave, etc.) et également des systèmes qui vont venir s'ajouter à ce dernier (récupération de chaleur perdue, lubrification à l'air de la coque, etc.). La seconde catégorie de mesures concernant l'efficacité énergétique ne concerne pas directement le navire matériellement mais davantage son usage par de l'optimisation (gestion logistique des escales, conduite autonome, routage météorologique, etc.).

Domaine	Description	Avantages	Limites	Solutions détaillées
Efficacité technologique	Ensemble de mesures technologiques permettant de réduire la consommation d'énergie ou les pertes énergétiques (optimisation des designs, récupération de chaleur, etc.)	- Certaines solutions ont un haut niveau de maturité technologique - Solutions déployables sur de nombreux types de navires	- Nécessite une opération de retrofit des navires en service (investissement sur la technologie, coût d'immobilisation de la flotte) - Retour sur investissement variable et parfois insuffisant pour inciter une décision d'investissement	- Optimisation des performances hydrodynamiques - Optimisation des performances propulsives et ESD - Injection d'air - Fouling - Récupération de chaleur/ froid - PTO/PTI - Energy Management System
Efficacité opérationnelle	Ensemble de mesures opérationnelles contribuant à la réduction de la consommation et des émissions, par un meilleur usage du navire (outils d'aide à la décision, suivi de performance, etc.) en lien avec son environnement (routage, optimisation des temps d'escale, etc.)	- Solution ne nécessitant pas de retrofit du navire - Solution déployable rapidement à l'échelle d'une flotte - Gains potentiellement significatifs	- Nécessité de réaliser des développements (en particulier de logiciel) - Nécessité d'accompagner le déploiement de solutions (formation des équipages, changement de pratiques, etc.)	- Formation des équipages - Monitoring des performances et aide à la décision - Routage - Optimisation de l'assiette - Optimisation des flottes et des profils opérationnels - Réduction du temps d'escale - Arrivée just in time

Tableau 3 Principales solutions d'efficacité énergétique (Sigrist et al., 2023)

Troisièmement, la dernière catégorie de mesures de décarbonation est la sobriété énergétique où il est possible de distinguer deux mesures. D'une part, on retrouve la réduction de vitesse qui permet de diminuer la consommation des navires mais qui, si elle n'est pas accompagnée d'une meilleure

gestion logistique, comme la réduction des temps d'arrêt, peut avoir un impact significatif sur l'activité économique. D'autre part, le report modal vers le maritime est une autre mesure de sobriété, à condition que ce dernier puisse assumer la charge d'un trafic plus dense comme nous l'avons évoqué au début de cette partie. Ce dernier point ne s'arrête donc pas uniquement au maritime mais concerne l'ensemble des mobilités, tels que le routier ou l'aérien.

Solution	Description	Avantages	Limites
Réduction de vitesse	En l'absence d'amélioration significative de leurs performances écoénergétique, des mesures de baisse de vitesse des navires seront les ultimes solutions à s'imposer aux exploitants de flottes pour réduire les consommations et émissions	– Solution simple : les vitesses de navigation des navires sont contrôlables – Solution efficace : la consommation d'énergie d'un navire est de l'ordre du cube de sa vitesse (– 30 % sur la consommation avec – 10 % sur la vitesse)	– Fort impact de la mesure sur l'activité économique – Réduction des volumes transportés par le maritime – Report modal inversé vers la route ou l'aérien, beaucoup moins efficaces en termes énergétiques (à même tonne.kilomètre transportée)
Report modal	Utilisation du maritime et du fluvial en complément de la route ou de l'aérien pour réduire l'empreinte carbone des mobilités	Permet une baisse globale de l'énergie nécessaire pour le transport des personnes, matières, premières, nourritures, biens de consommation	– Nécessite des infrastructures adaptées – Les baisses de vitesses qui pourraient s'imposer au maritime auront un effet inverse de report du maritime vers le routier ou l'aérien, ce qui serait un non-sens à tous points de vue

Tableau 4 Principales solutions de sobriété énergétique (Sigrist et al., 2023)

On a donc vu que la décarbonation du secteur maritime est un enjeu majeur pour atteindre les objectifs climatiques à l'horizon 2050. Pour cela, une combinaison de différents leviers complémentaires sont à l'étude ou bien déjà opérationnels : substitution des carburants fossiles par des énergies à plus faible intensité carbone, amélioration de l'efficacité énergétique des navires et adoption de pratiques plus sobres en énergie. Ces transitions nécessitent des investissements rapides et coordonnés de la part des différents acteurs du maritime et en cohérence avec la longue durée de vie des navires et la montée progressive des exigences réglementaires. Ces investissements concernent à la fois la construction des navires, la recherche et le développement des améliorations technologiques, la production d'énergie décarbonée et le renouvellement d'infrastructures portuaires. À condition de réussir sa transition, le transport maritime peut non seulement préserver son avantage environnemental par tonne-kilomètre, mais aussi renforcer son rôle dans une logique de report modal à l'échelle globale.

Contexte de la mission

L'institut MEET2050



Figure 5 Logo de MEET2050, Institut national de la décarbonation du maritime

Comme nous venons de le voir, la décarbonation du maritime nécessite l'implication de l'ensemble des acteurs du secteur. Pour cela, MEET2050, un institut sous format associatif a été créé en 2023 par la Coalition pour la Transition Écologique et Énergétique du Maritime (T2EM) dans le but de fédérer l'ensemble des acteurs de la filière maritime au niveau national. En effet, avec le soutien de l'État et des collectivités, MEET2050 permet de mutualiser les moyens humains et financiers au sein d'un centre d'expertise, comme le font d'autres pays à l'instar de la Norvège, de l'Allemagne ou du Danemark. L'équipe de MEET2050 est composée d'acteurs experts dans des domaines divers : technologie, énergie, économie, finance, souveraineté, réglementation, formation, etc. On peut donc retrouver différentes parties prenantes : armateurs, ports, bureaux d'études, chantiers navals, équipementiers, producteurs d'énergie, établissements de recherche, centres de formation, etc.



Figure 6 Partenaires stratégiques, soutiens institutionnels et adhérents de MEET2050 (Institut MEET2050, 2025)



Figure 7 Partenaires techniques et scientifiques de MEET2050 (Institut MEET2050, 2025)

Pour ce centre d'expertise national de décarbonation du maritime, les conditions qui permettront de réussir la décarbonation du milieu sont les suivants : un équilibre entre le marché de l'offre et de la demande, des réglementations et politiques publiques adaptées, des financements publics et privés à la hauteur des besoins, des innovations technologiques et sociales, une collaboration et un partage d'informations fiabilisées entre les acteurs et, enfin, le développement de compétences, d'expertises nouvelles et de formations adaptées.

MEET2050 a donc pour objectifs de réaliser un état des lieux, d'identifier des leviers de décarbonation et des financements et de développer un outil de modélisation de scénarios de décarbonation. C'est alors pour répondre à l'ensemble de ces points que l'outil CAP2050 est porté par MEET2050 depuis le 8 mars 2024 (Institut MEET2050, 2025).

CAP2050

Le projet CAP 2050, porté par MEET 2050, vise à accompagner la transition énergétique du secteur maritime et fluvial en développant des outils de modélisation, des bases de données fiables et des scénarios de décarbonation à différentes échelles (France, Europe et international). En raison de la complexité de cette transition et du manque d'outils partagés, le projet vise à structurer une réponse commune en s'appuyant sur cinq axes de travail :

- définition des cas d'usage,
- fiabilisation des données,
- développement de modèles et d'un logiciel de simulation,
- réalisation de scénarios,
- communication des résultats.

Le logiciel CAP 2050 permet notamment d'évaluer les trajectoires de transition, d'intégrer des données incertaines, de comparer les énergies et motorisations possibles, et de prendre en compte l'empreinte environnementale des navires sur l'ensemble de leur cycle de vie. Le projet, soutenu par de nombreux acteurs publics et privés, est financé à hauteur de 375 000 euros sur deux ans et prévoit une large diffusion des résultats pour guider les stratégies industrielles et les politiques publiques. Cet outil d'aide à la décision propose donc des modélisations prenant en compte les nombreux paramètres que nous avons évoqués précédemment : puissance, autonomie et profils d'usage du navire, technologies disponibles à bord d'un navire, disponibilité des énergies biosourcées ou des e-fuels, gains d'efficacité qu'il sera possible de faire dans les années à venir, analyses sur le cycle de vie complet du « puits au sillage », CAPEX et OPEX des différentes solutions, durée de vie des navires et nouvelles solutions sur 25 ans, déploiement de solutions alternatives comme la propulsion vélique, changement et optimisation des routes maritimes par rapport à l'énergie ou au vent, etc.

Toutefois, le modèle de décarbonation actuel se veut accessible à l'ensemble des acteurs du maritime, et est dit simplifié, car fondé sur une représentation moyenne des navires en activité. Le modèle prend en compte l'évolution de la population de navires (définis par leur âge et leur technologie de propulsion initiale) qui se décline en constructions neuves (équipées de technologies émergentes et disponibles en fonction du taux de maturité de ces dernières) et opérations de rétrofit (mesures techniques, énergétiques ou opérationnelles appliquées aux navires existants). Le modèle permet alors la représentation de l'évolution de la consommation énergétique de la flotte et des émissions de CO₂, modélisées par type d'énergie utilisée (fioul, gaz, hydrogène, méthanol) selon un mix énergétique évolutif. Les émissions totales sont estimées en distinguant les phases : Well-to-Tank (comprenant la production, le transport, la transformation et la distribution du combustible), Tank-to-Wake (les émissions résultant de l'utilisation du carburant à bord du navire) et Well-to-Wake (la somme des

émissions des deux phases précédentes). Ceci rend alors possible l'évaluation du budget carbone global de la flotte sur la période considérée. Les trajectoires modélisées peuvent ainsi être représentées graphiquement, accompagnées des différentes réglementations (internationales ou européennes) et du scénario « Business as usual ». Ce dernier montre les tendances d'émissions ou de consommation d'énergie obtenues dans un scénario où aucune modification technique, énergétique ou opérationnelle n'est apportée aux segments de la flotte étudiée (Sigrist *et al.*, 2023).

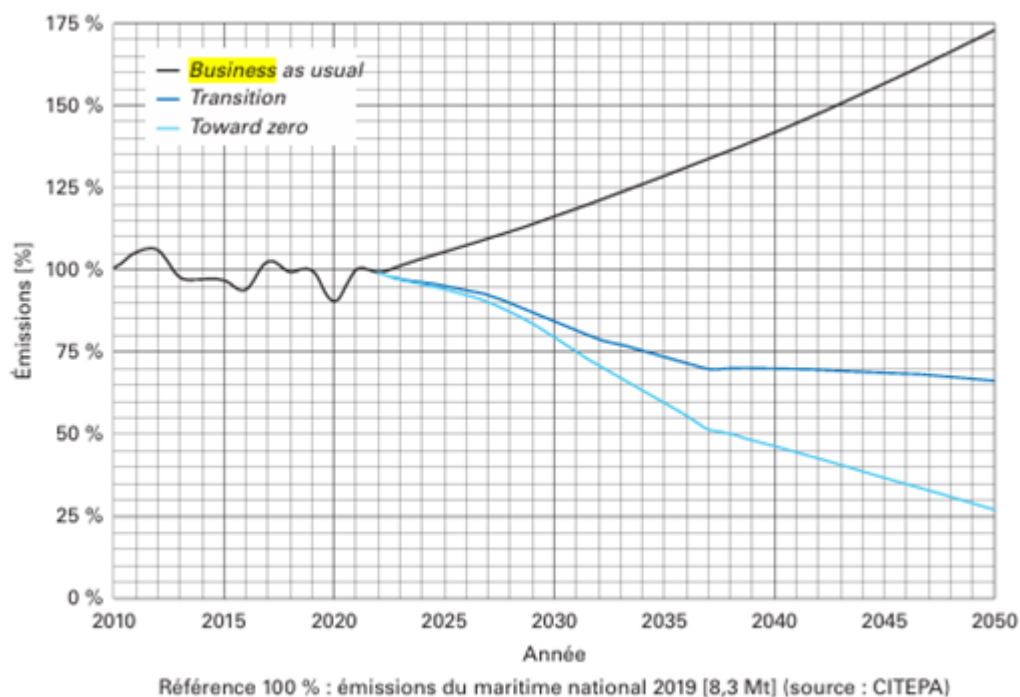


Figure 8 Simulation de l'évolution des émissions de la flotte mondiale selon trois scénarios fictifs (Sigrist *et al.*, 2023)

Eye-PI

La société dans laquelle j'ai effectué mon stage de 4^e année, eye-PI, dont les locaux sont situés au 49, boulevard Preuilly à Tours, est spécialisée dans l'expertise scientifique et technique. Elle œuvre au service de clients industriels des secteurs du naval, du maritime et de l'énergie, et s'inscrit pleinement dans le projet CAP2050. En effet, son président, Jean-François SIGRIST, ingénieur-chercheur, est co-porteur du projet MEET2050. Au sein de MEET2050, son rôle est directeur scientifique, chargé des relations de l'institut avec ses partenaires académiques.

Eye-pi a donc co-développé le modèle de transition énergétique pour le transport maritime que nous avons évoqué plus tôt, intégré dans un outil « preuve de concept » disponible sous Excel. Ce modèle permet de guider les prises de décision (conditions d'atteinte des objectifs, évaluation des ressources nécessaires) en se fondant sur la comparaison de différents scénarios de décarbonation. L'outil est actuellement utilisé par la société eye-PI en soutien de prestations réalisées par MEET2050 pour les acteurs du maritime national. Il s'appuie sur des données technico-économiques liées la décarbonation, ainsi que sur des modèles de consommation et d'émissions.

Contenu du stage

Mon stage au sein d'eye-PI s'est centré sur les données et le modèle de décarbonation du projet CAP2050. Plus précisément, le travail a consisté en la compréhension du modèle et des données l'alimentant, l'enrichissement et la structuration de plusieurs bases de données au format Excel que nous verrons en détail par la suite, et enfin le pilotage du modèle de CAP2050 par la simulation de trajectoires de décarbonisation.

Phase d'introduction au domaine maritime

Le domaine maritime étant complètement nouveau pour moi, la toute première partie de mon stage a consisté en l'introduction de ce secteur et l'assimilation de certains termes techniques et récurrents. Pour cela, j'ai eu l'occasion de lire plusieurs textes de la littérature scientifique concernant la décarbonation du maritime.

Le premier texte a été « Transition énergétique du maritime : Enjeux, défis et moyens d'action », datant de 2023 et écrit par Jean-François Sigrist, Erwan Jacquin et Emmanuel-Marie Peton. Ce document m'a permis de comprendre le poids du maritime à l'échelle économique mondiale et les enjeux liés aux émissions de gaz à effet de serre de ce moyen de transport. En effet, il explique en détail les différentes réglementations et méthodes de calculs des émissions à l'échelle mondiale, européenne et française. De plus, le document dresse un état des lieux et une typologie des différents leviers de décarbonation adoptés et en développement. Enfin, le texte aborde le modèle de décarbonation, développé dans le cadre de CAP2050, en détaillant les étapes intégrant la sobriété, l'efficacité énergétique, la substitution de carburants, et l'évolution des chaînes logistiques. Ce document m'a donc permis d'avoir une vision d'ensemble sur le sujet de mon stage et sur les outils que j'allais pouvoir utiliser.

Ensuite, le deuxième article scientifique que j'ai eu l'occasion de lire dans l'optique de me familiariser avec la décarbonation du maritime a été « How to decarbonise international shipping : Options for fuels, technologies and policies », de 2019 et dont les auteurs sont Paul Balcombe, James Brierley, Chester Lewis, Line Skatvedt, Jamie Speirs, Adam Hawkes et Iain Staffell. Le document évoque les options techniques, environnementales et politiques pour décarboner le transport maritime international et détaille notamment l'ensemble des carburants alternatifs aux combustibles fossiles. Sont ainsi décrits les caractéristiques et enjeux du gaz naturel liquéfié (GNL), des biocarburants, du méthanol, de l'hydrogène, de l'électricité et du nucléaire. En outre, il est également question dans le texte de mesures d'efficacité énergétique. Premièrement, la réduction de vitesse (*slow streaming* en anglais), pouvant réduire les émissions de jusqu'à 60% mais avec comme contrepartie d'allonger significativement la durée des voyages. Deuxièmement, l'assistance éolienne et solaire, comme moyen de propulsion principal ou auxiliaire, encore à un stade précoce de développement. Troisièmement, le revêtement de la coque (ou *antifouling* en anglais) qui doit être lisse afin d'éviter l'accumulation d'algues ou de mollusques, ce qui entraînerait une augmentation des frottements et, par conséquent, une consommation de carburant plus élevée. Plusieurs produits furent utilisés au fil des années mais certains contenant du tributylétain ont été interdits en raison de leur toxicité pour les écosystèmes. Aujourd'hui, deux alternatives sont utilisées : les produits à base de biocide, pouvant être nocifs pour l'environnement, et les technologies sans biocides, plus difficiles à appliquer et plus coûteuses. Quatrièmement, la récupération de chaleur (*waste heat recovery* en anglais), réduisant de 4 à 16% la consommation de carburant. Cinquièmement, on retrouve les méthodes de capture de carbone (CSS pour *carbon capture and storage* en anglais), encore peu développées et en phase de recherche. Enfin, le document évoque les politiques de décarbonation que nous avons vu précédemment et met en évidence le fait qu'aucune des mesures citées ne doit être appliquée seule. En effet, ce n'est qu'en

combinant un carburant alternatif avec plusieurs mesures d'efficacité énergétique que les objectifs d'émissions seront atteints (Balcombe et al., 2019).

Le dernier document que j'ai eu l'occasion de lire dans le cadre de l'appropriation du sujet a été « State-of-the-art technologies, measures, and potential for reducing GHG emissions from shipping – A review », écrit par Evert A. Bouman, Elizabeth Lindstad, Agathe I. Rialland et Anders H. Strømman. Cet article est une compilation de 150 études datant d'après 2009 sur les mesures de décarbonation du maritime. L'objectif est de fournir une vue d'ensemble et de mettre en évidence des éléments de comparaison entre les différentes mesures (figure 9). Tout d'abord, le document distingue six catégories de mesures : design de la coque, économie d'échelle, puissance et propulsion, routage météorologique et ordonnancement, carburants et sources d'énergie alternatives, et vitesse. (Bouman et al., 2017). Le texte montre par la suite les potentielles réductions d'émissions (uniquement de CO₂) des mesures individuellement et explique qu'elles ne sont pas toutes adaptées à tous les types de navires. Pour finir, il est conclu que les résultats présentés sont soumis à de grandes incertitudes et que les pourcentages de réduction ne sont pas additionnables car certaines mesures ne sont pas compatibles ou mutuellement exclusives. Ce dernier point est crucial lorsque l'on souhaite adopter plusieurs mesures de décarbonation et fait partie des données qu'il m'a été demandé de récolter à travers des matrices de compatibilité.

Author(s)	Method for calculation of potential	Application	Hull design	Economy of Scale	Power& Propulsion	Speed	Fuels & alt. Energy Sources	Routing & Scheduling	Fuel price (\$/ton)	Fleet reference year	Final year of scenario	BAU emissions in final year (Mt CO ₂)	Identified CO ₂ emission reduction potential (%)
Buhaug et al. (2009)	Expert estimates, fleet development scenario model 25 measures	18 ship types, world fleet	x	x	x	x	x	x	500	2007	2020 2050	1294 2595	16–34% 58–75%
Faber et al. (2009)	Same as Buhaug et al. (2009) 29 measures	9 ship types, 40,055 ships	x		x	x	x	x	700	2006	2030	1790	27–47%
Alvik et al. (2010)	Expert estimates 25 measures	59 ship segments, world fleet	x		x	x	x	x		2009	2030	1530	56%
Wang et al. (2010)	Similar to Buhaug et al. (2009) 22 measures	14 ship types, world fleet	x	x	x	x		x	700 900	2007	2020 2030	1421 2205	35–45% 35–45%
Faber et al. (2011)	Updated of Wang et al. (2010)	14 ship types	x		x	x	x	x	700 900	2007	2020 2030	1204 1982	20–46% 20–46%
Eide et al. (2011)	CO ₂ emission scenario model 25 measures	59 ship types, world fleet, 59,800 ships	x		x	x	x	x	350	2008 2008	2020 2030	1191 1533	41% 56%
Hoffmann et al. (2012)	Cost-effectiveness. 25 measures	59 ship segments, world fleet	x		x	x	x	x		2010	2030	1316	30–53%
CCNR (2012)	Model-based. 27 measures	Inland navigation, Western Europe	x	x	x	x	x	x		2010	2050	2.9	58%
Eide et al. (2013a)	Same as Eide et al. (2011) 27 measures	59 ship segments, world fleet, 59,800 ships	x		x	x	x	x	300–1500	2008	2050	2000	55–95%
Eide et al. (2013b)	Same as Eide et al. (2011) 15 measures (existing ships)	59 ship segments, world fleet, 59,800 ships	x		x	x	x	x		2010	2010	999	25–32%
Lindstad (2013)	Model-based. 5 main measures	11 ship types, 109,000 bt nm	x	x		x		x	120–1200	2007	2050	2199 2650	77% 76%
Kollamthodi et al. (2013)	Scenario model. 3 main measures	European shipping		x			x			2010 2010	2030 2050	279 403	20% 33%
Heitmann and Peterson (2014)	Abatement costs scenarios, 22 measures	14 ship types	x		x	x	x	x	350–900	2012	2020	947	22–48%
TNO Lindstad et al. (2015a)	Model-based. 12 measures (existing ships)	10 ship types, world fleet	x	x	x	x	x	x	300–1200	2012	2030	2007	30–45%
Median											2020 2030 2050	1204 1790 2397	35% 39% 73%

Figure 9 Réduction potentielle des émissions de CO₂ du transport maritime au niveau de la flotte, toutes mesures confondues (source : Bouman et al., 2017)

Ces documents m'ont donc permis d'en apprendre beaucoup sur la décarbonation du maritime, particulièrement sur les mesures d'efficacité énergétique, qui allaient être l'objet de ma première tâche.

Base de données technologies

La première mission qui m'a été confiée a été la création d'une base de données regroupant toutes les technologies de décarbonation issues de divers articles scientifiques. L'idée était d'avoir, sous Excel, un inventaire des différentes mesures de décarbonation et différentes informations pour chacune d'entre elles que nous allons aborder en détail par la suite.

Pour cela, j'ai utilisé, au total, sept références littéraires pour construire cette base de données, en commençant par un document du Det Norske Veritas (DNV), nommé Energy-Efficiency measures and technologies, de 2025. Ce document était idéal pour débiter car très accessible et détaillé. Après un rappel des enjeux et défis de la décarbonation du maritime, il listait une quarantaine de mesures de réduction d'émissions regroupées en sept catégories : consommation d'énergie, production d'énergie, propulsion et coque, machines, opérationnel, convertisseur d'énergie et autre.

Parmi l'ensemble des mesures mentionnées dans les documents du DNV, certaines m'étaient familières comme la réduction de vitesse ou le revêtement de la coque. En revanche, beaucoup d'autres m'étaient inconnues et allaient revenir dans bon nombre d'autres références. Par exemple, la lubrification à l'air (*air lubrication* en anglais), qui consiste à réduire la résistance hydrodynamique en injectant de l'air sous la coque, ce qui permet de réduire les frottements entre la carène et l'eau. Par ailleurs, la propulsion par le vent est souvent évoquée dans les articles avec plusieurs systèmes à l'étude et en test. Tout d'abord, les cylindres rotatifs (*rotor sail* en anglais), qui, grâce à leur rotation, créent une différence de pression entre les deux côtés et génèrent ainsi une force de poussée perpendiculaire au vent. Ensuite, les ailes d'aspiration (*suction wing* en anglais), qui, en étant placées à la verticale, génèrent une force de poussée de la même façon qu'une aile d'avion génère une portance. Pour continuer, on trouve les voiles rigides et souples. Les premières, à l'image des ailes d'aspiration, sont des structures aérodynamiques fixes ou orientables, proches d'une aile d'avion tandis que les secondes reprennent le principe des voiles traditionnelles (en toile), mais peuvent être enroulables ou repliables, offrant une plus grande flexibilité. Enfin, les cerfs-volants de traction, captant des vents plus puissants et constants en altitude, ce qui les rend efficaces pour des routes longues et régulières, bien que ces derniers soient une technologie plus récente et moins éprouvée à très grande échelle (figure 10).

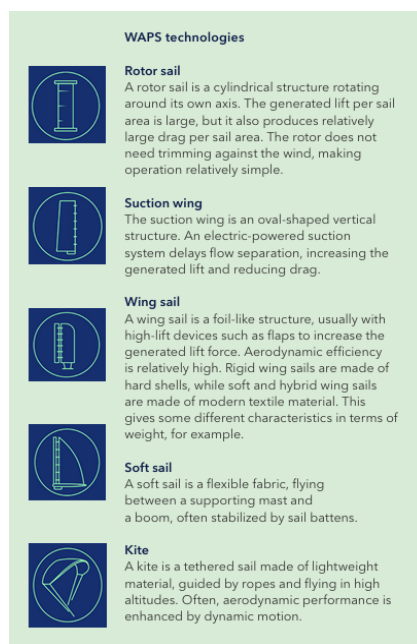


Figure 10 Technologies de système de propulsion assistée par le vent (source : DNV, 2025)

Dans le rapport du DNV, pour chaque mesure, un grand nombre d'informations étaient indiquées et celles-ci ont donc été intégrées à la base de données. Premièrement le gain d'efficacité (en %), sous forme d'un intervalle, qui correspond au gain relatif attendu sur la consommation de carburant. Beaucoup d'incertitudes sont liées au gain d'efficacité car il dépend du type, de la taille et de l'âge du navire et des conditions opérationnelles. Le gain d'efficacité permet également de déterminer, après l'application d'une mesure, la consommation annuelle de carburant et les émissions de CO₂ évitées. Deuxièmement, on retrouve les informations sur le coût des mesures, le CAPEX et l'OPEX. Le *Capital Expenditure*, ou CAPEX (souvent exprimé en kUSD), représente le coût initial d'investissement pour mettre en œuvre la mesure (production et installation). L'*Operational Expenditure*, ou OPEX (souvent exprimé en kUSD/an ou en pourcentage) concerne les coûts de maintenance ou opérationnels. Troisièmement, le taux d'adoption va permettre de connaître la part des navires d'un certain type ayant adopté une technologie donnée. Quatrièmement, afin de déterminer le niveau de maturité des différentes mesures, on utilise le Technology Readiness Level, ou TRL, sur une échelle de 1 à 9, à l'origine utilisé par la NASA. Alors qu'une technologie ayant un TRL de 1 représente le plus bas niveau de maturité, seulement basé sur des observations, une technologie avec un TRL de 9 a prouvé son opérationnalité à plusieurs reprises. Cinquièmement, il est aussi possible de caractériser les mesures de décarbonation par leur temps d'implémentation, souvent exprimé en mois et pouvant aller jusqu'à 18 par exemple pour les systèmes de récupération de chaleur. Sixièmement, le DNV propose, pour chaque mesure, la compatibilité de ces dernières avec plusieurs critères de navires : l'âge (construction neuve ou rétrofit), le type et la taille. Enfin, le rapport évalue chaque mesure selon son impact sur les indicateurs que nous avons vu dans la partie réglementation : l'EEDI, l'EEXI, le CII, l'ETS, le règlement FuelEU Maritime et le GHG Fuel Index (indicateur standardisé pour comparer les carburants en termes de GES sur tout leur cycle de vie) (figure 11).

	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
	Source	Identifiant de la donnée	Numéro	Type	Groupe	Mesure	CAPEX	OPEX	Impact	Impact	Impact	Impact	Impact	Impact
7	DNV, 2025a	NOR	1	Efficacité énergétique	Energising technologies	Optimisation des systèmes auxiliaires	Auxiliary systems optimization	50	1000	par navire	2%			
8	DNV, 2025a	NOR	2	Efficacité énergétique	Energising technologies	Système d'éclairage éco-efficace	Energy-efficient lighting system	20	1000	par navire	2%			
9	DNV, 2025a	NOR	3	Efficacité énergétique	Energising technologies	Optimisation des systèmes de maintenance	Optimization of cargo handling system	5	10	par navire	2%			
10	DNV, 2025a	NOR	4	Energie renouvelable	Use of renewable energy	Panneaux solaires	Solar panels	15	3	par navire	2%			
11	DNV, 2025a	NOR	5	Energie renouvelable	Use of renewable energy	Production d'énergie	Wind-assisted propulsion systems	500	3000	par navire	2%			
12	DNV, 2025a	NOR	5.1	Energie renouvelable	Use of renewable energy	Production d'énergie	Wind-assisted propulsion systems (Flettner rotor)	500	3000	par navire	2%			
13	DNV, 2025a	NOR	5.2	Energie renouvelable	Use of renewable energy	Production d'énergie	Wind-assisted propulsion systems (Savonius sail)	500	3000	par navire	2%			
14	DNV, 2025a	NOR	5.3	Energie renouvelable	Use of renewable energy	Production d'énergie	Wind-assisted propulsion systems (Rigid sail)	500	3000	par navire	2%			
15	DNV, 2025a	NOR	5.4	Energie renouvelable	Use of renewable energy	Production d'énergie	Wind-assisted propulsion systems (Elastic wing)	500	3000	par navire	2%			
16	DNV, 2025a	NOR	5.5	Energie renouvelable	Use of renewable energy	Production d'énergie	Wind-assisted propulsion systems (Hybrid)	500	3000	par navire	2%			
17	DNV, 2025a	NOR	6	Efficacité énergétique	Energising technologies	Production d'énergie	Wind-assisted propulsion systems (Hybrid)	500	3500	par navire	2%			
18	DNV, 2025a	NOR	7	Efficacité énergétique	Energising technologies	Production d'énergie	Wind-assisted propulsion systems (Hybrid)	500	1500	par navire	2%			
19	DNV, 2025a	NOR	8	Efficacité énergétique	Energising technologies	Production d'énergie	Wind-assisted propulsion systems (Hybrid)	500	600	par navire	2%			
20	DNV, 2025a	NOR	9	Efficacité énergétique	Energising technologies	Production d'énergie	Wind-assisted propulsion systems (Hybrid)	500	1500	par navire	2%			
21	DNV, 2025a	NOR	10	Efficacité énergétique	Energising technologies	Production d'énergie	Wind-assisted propulsion systems (Hybrid)	500	1500	par navire	2%			
22	DNV, 2025a	NOR	11	Efficacité énergétique	Energising technologies	Production d'énergie	Wind-assisted propulsion systems (Hybrid)	500	1500	par navire	2%			
23	DNV, 2025a	NOR	12	Efficacité énergétique	Energising technologies	Production d'énergie	Wind-assisted propulsion systems (Hybrid)	500	1500	par navire	2%			
24	DNV, 2025a	NOR	13	Efficacité énergétique	Energising technologies	Production d'énergie	Wind-assisted propulsion systems (Hybrid)	500	1500	par navire	2%			
25	DNV, 2025a	NOR	14	Efficacité énergétique	Energising technologies	Production d'énergie	Wind-assisted propulsion systems (Hybrid)	500	1500	par navire	2%			
26	DNV, 2025a	NOR	15	Efficacité énergétique	Energising technologies	Production d'énergie	Wind-assisted propulsion systems (Hybrid)	500	1500	par navire	2%			
27	DNV, 2025a	NOR	16	Efficacité énergétique	Energising technologies	Production d'énergie	Wind-assisted propulsion systems (Hybrid)	500	1500	par navire	2%			
28	DNV, 2025a	NOR	17	Production d'énergie décarbonée	Low carbon energy production	Production d'énergie	Wind-assisted propulsion systems (Hybrid)	500	1500	par navire	2%			
29	DNV, 2025a	NOR	18	Efficacité énergétique	Energising technologies	Production d'énergie	Wind-assisted propulsion systems (Hybrid)	500	1500	par navire	2%			
30	DNV, 2025a	NOR	19	Efficacité énergétique	Energising technologies	Production d'énergie	Wind-assisted propulsion systems (Hybrid)	500	1500	par navire	2%			
31	DNV, 2025a	NOR	20	Efficacité énergétique	Energising technologies	Production d'énergie	Wind-assisted propulsion systems (Hybrid)	500	1500	par navire	2%			

Figure 11 Extraits de la base de données technologies (source : eye-PI)

Le document contenait également deux figures que j'ai extraites dans la base de données : la part des navires utilisant ces technologies au sein de la flotte mondiale, et une matrice sur la compatibilité des mesures que nous avons évoquée dans la partie précédente (figure 12).

			Energy consumers			Energy harvesting		Propulsion and hull								
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
		Measure	Auxiliary system optimization	Energy-efficient lighting system	Optimization of Cargo Handling Systems	Solar panels	Wind-assisted propulsion systems	Air lubrication system	Bulbous bow retrofit	High-performance coatings	High-efficiency rudder	Hull and propeller cleaning	Hull form optimization	Hull form optimization for real sea states	Energy-saving devices AFT of propeller	Energy-saving devices FvD of propeller
Energy consumers	1	Auxiliary system optimization	-	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
	2	Energy-efficient lighting system	2	-	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
	3	Optimization of Cargo Handling Systems	2	2	-	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Energy harvesting	4	Solar panels	2	2	2	-	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
	5	Wind-assisted propulsion systems	2	2	2	2	-	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Propulsion and hull	6	Air lubrication system	2	2	2	2	2	-	2	1	2	2	2	2	2	2
	7	Bulbous bow retrofit	2	2	2	2	2	2	-	2	2	2	2	2	2	2
	8	High-performance coatings	2	2	2	2	2	1	2	-	2	1	2	2	2	2
	9	High-efficiency rudder	2	2	2	2	2	2	2	2	-	2	2	2	1	1
	10	Hull and propeller cleaning	2	2	2	2	2	2	2	1	2	-	2	2	2	2
	11	Hull form optimization	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	-	2	2	2
	12	Hull form optimization for real sea states	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	-	2	2
	13	Energy-saving devices AFT of propeller	2	2	2	2	2	2	2	2	1	2	2	2	-	1
	14	Energy-saving devices FvD of propeller	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	2	2	1	-

Figure 12 Extraits de la matrice de compatibilité de la base de données technologies (source : eye-PI)

Suite à l'extraction des données du document du DNV, j'ai effectué le même travail pour d'autres références : l'article « State-of-the-art technologies, mesures, and potential for reducing GHG emissions from shipping – A review » évoqué dans la partie précédente, le rapport « Energy Efficiency and decarbonization technical guide » rédigé par le Department of Transportation des États-Unis, des données de l'IMO et trois autres articles scientifiques.

À chaque nouveau document, la classification des différentes mesures n'était pas la même, il a donc fallu les regrouper sous la même typologie. Par ailleurs, pour une même mesure, l'appellation n'était pas toujours identique, il était donc très utile d'avoir lu plusieurs documents sur les mesures de décarbonation pour faciliter leur regroupement. Ainsi, la base permet, grâce à la fonction filtre d'Excel, de retrouver une mesure de décarbonation à partir d'un mot clé et de voir, pour chaque référence académique, leurs différentes caractéristiques.

Tout au long de mon stage, j'ai ajouté de nouvelles références au sein de cette base de données. Seulement, les échelles de mesures ou les unités utilisées pour les différentes caractéristiques étaient souvent très différentes d'un document à l'autre. Une partie du travail a donc également été d'uniformiser la base de données afin de comparer les différentes références entre elles.

Pour finir, j'ai également pu collecter et intégrer au sein de cette base de données, des informations sur le coût des constructions neuves et de démantèlement pour différents types de navires.

Base de données flotte

La deuxième base de données sur laquelle j'ai pu travailler concernait la flotte de navire mondiale, européenne et française. Cette base de données est particulièrement utile dans des analyses d'émissions de CO₂ des différents navires en service mais aussi d'autres caractéristiques que nous allons évoquer.

Données brutes

La première étape du travail a été de recueillir les informations des navires provenant de fichiers Excel externes au sein de la base de données pour la flotte française et européenne (le travail pour la flotte mondiale ayant été réalisé par un autre stagiaire).

Pour les données brutes de la partie France, les enregistrements étaient divisés en types de carburant utilisés. Par exemple, un navire consommant à la fois du diesel et du fioul lourd était décomposé en deux lignes dans le tableau d'origine. En revanche, notre objectif était d'avoir une seule ligne par navire et des colonnes indiquant la consommation ou non des différents types de carburant (figure 13). Pour cela, j'ai utilisé la fonction « Tableau croisé dynamique » d'Excel afin d'agrégier les lignes ayant le même numéro de navire et de créer les colonnes décrivant la consommation par type de carburant.

	W	X	Y	Z	AA	AB	AC	AD
							Consumption (t) Consumption (t)	
nav	Fuel Heavy Heavy Fuel Oil (HFO)	Fuel Inert Subst Heavy Fuel Oil (LSHFO)	Fuel Light Light Fuel Oil (LFO)	Fuel Light & Inert Subst Heavy Fuel Oil (LSLFO)	Diesel/Gazole Diesel/Gas Oil (MGO/MGO2)	Gasoil marine à faible teneur en soufre Low Sulfur Marine Gas Oil (LSMGO)	Gas naturel Liquéfié (GNL) Liquefied Natural Gas (LNG)	Gas de pétrole Liquéfié - Butane (GPL) Liquefied Petroleum Gas - Butane (LPG)
1	4335					194		
2	4357					513		
3	9632			3088		624		
4	13857					959		
5	10902					541		
6	18273					1655		
7	10966					854		
8	17553					1196		
9	14251					1331		
10	6272					912		
11	18476					926		
12	9822					1011		
13	626							
14	12353					1573		
15	11367			590		1817		
16	9157			1725		36		
17	9806			1217		295		
18	9840			2004		139		
19	5149			324		831		
20	6076			516		1449		
21	7220					1445		
22	11135			945		11058		
23	10406			1112		523		
24	20077			794		269		
25	10800			3629		1018		
26	22046			4038		26		
27	12673			2293		729		
28	14460			4055		1834		
29	17329			6119		2462		
30	17368			5739		1513		
31	10342			2088		1364		
32	10322			5681		927		
33	10150			2302		927		

Figure 13 Exemples de consommations par type de carburant pour certains navires français (source : eye-PI)

En ce qui concerne la partie Européenne, les données provenaient du système de recensement MRV que nous avons évoqué précédemment. Les données concernaient donc tous les navires ayant fait au moins une escale dans un port européen durant l'année considérée. Contrairement aux données françaises, les enregistrements étaient déjà agrégés et le nombre de lignes était bien plus important (plus de 12 000 navires contre une centaine pour les navires sous pavillon français).

Les caractéristiques qui ont ainsi été obtenues pour chaque navire sont nombreuses. Tout d'abord, chaque navire possède un numéro IMO qui permet de l'identifier, à la manière d'une plaque d'immatriculation, et une nationalité de rattachement, aussi appelée « pavillon » du navire. Ensuite, les navires sont divisés en segments, qui représentent leur catégorie fonctionnelle et opérationnelle. On retrouve par exemple les porte-conteneurs, les vraquiers (contenant des cargaisons sèches en vrac), les pétroliers, les gaziers, les navires de croisière, ou encore les navires RoRo/RoPax (navire transportant des voitures ou ferries). Par ailleurs, un navire va être caractérisé par sa taille et sa capacité. Pour cela, on trouve d'une part, plusieurs indicateurs communs à tous les types de navires : la jauge brute (*gross tonnage* en anglais), qui correspond au volume total intérieur, la jauge nette (*net tonnage* en anglais), qui ne considère que le volume utile au transport de marchandises ou de

passagers et le port en lourd (*deadweight tonnage* en anglais), qui est la masse totale qu'un navire peut transporter (cargaison, carburant, provisions, équipage), exprimée en tonnes. D'autre part, les deux autres indicateurs de capacité vont être spécifiques à un type de navire. Pour les porte-conteneurs, l'unité de mesure est l'équivalent vingt pieds (*twenty-foot equivalent unit* en anglais), où un EVP équivaut à un conteneur de 20 pieds. Pour les transporteurs de gaz, c'est le milliard de mètres cubes (*billion cubic meters* en anglais) qui est utilisé et qui correspond à un milliard de mètres cubes de gaz à l'état gazeux à température et pression normales. Pour continuer, les navires sont décrits par leur puissance installée, comprenant la puissance totale de la propulsion principale, la puissance totale du ou des moteur(s) auxiliaire(s) et la puissance de la chaudière. Si on s'intéresse maintenant aux données variables, on retrouve la distance parcourue ainsi que le temps passé en mer, qui nous permettent de déterminer une vitesse de croisière moyenne pour chaque navire. Enfin, la base de données contient les informations liées aux consommations de carburant en tonnes et en térawattheures.

C'est à partir de ces informations qu'il est possible de calculer les émissions en mégatonnes de CO₂ pour la partie TTW (émissions directes) et en mégatonnes de CO₂e pour la partie WTW (sur l'ensemble du cycle de vie). Pour cela, j'ai utilisé des facteurs d'émission provenant de FuelEU maritime multipliés par les consommations en tonnes. Une autre mesure pertinente est l'intensité carbone, qui montre les émissions rapportées au transport d'une tonne de marchandise sur un kilomètre ou à la consommation totale en térawattheures. Cela permet donc de comparer l'efficacité énergétique des différents navires avec une mesure relative et non brute des émissions.

Compilation des données et statistiques

Après avoir récolté les données brutes de la flotte mondiale et française, mon travail a été de réaliser une synthèse statistique des différentes caractéristiques que nous venons de voir (figure 15). Pour cela, chaque navire appartient à une catégorie en fonction de son type et de sa capacité. J'ai donc utilisé dans un premier temps la fonction « [NB.SI.ENS](#) » d'Excel pour compter le nombre de navires correspondant à un type précis et dont la capacité était comprise entre deux bornes. La seule particularité était pour les navires de type *liquefied gas tanker*, qui comprennent à la fois les *gas carrier* et les *LNG carrier*. C'est donc la somme de deux fonctions « [NB.SI.ENS](#) » qui a été utilisée pour effectuer la synthèse de ces deux types (figure 14).

```
=NB.SI.ENS('Données DCS France'!$H$6:$H$121;"Gas carrier";'Données DCS France'!$M$6:$M$121;">="&E29;'Données DCS France'!$M$6:$M$121;"<="&F29)+NB.SI.ENS('Données DCS France'!$H$6:$H$121;"LNG carrier";'Données DCS France'!$M$6:$M$121;">="&E29;'Données DCS France'!$M$6:$M$121;"<="&F29)
```

Figure 14 Exemple de formule Excel pour la synthèse des données de la flotte française (source : eye-PI)

Pour la synthèse des autres caractéristiques, la fonction « [MOYENNE.SI.ENS](#) » a été utilisée pour obtenir la moyenne des caractéristiques suivantes : port en lourd, puissance de propulsion, vitesse, nombre de jours en mer et distance naviguée. Par ailleurs, pour les consommations de carburant et les émissions de CO₂, l'objectif était d'avoir le total à l'échelle de toute la flotte, c'est donc la fonction « [SOMME.SI.ENS](#) » qui fut cette fois-ci utilisée.

Segment	Catégorie	Unité	Nombre de navires	Capacité moyenne (tonnes)	Capacité moyenne (tonnes)	Vitesse design moyenne (nœuds)	Nombre de jours moyen en mer	Nombre de jours moyen (eaux internationales)	Nombre de jours moyen (zone SECA)	Vitesse moyenne SOG en mer (nœuds)	Distance moyenne naviguée (nm)	Capacité de transport (GT.net)
Segment	Catégorie	Unité	Number of vessels	Average deadweight (tons)	Average gross tonnage (GT.net)	Average design speed (knot)	Average days at sea	Average days at sea (international)	Average days at sea (SECA)	Average SOG speed at sea (knot)	Average distance sailed (nm)	Transport Load (GT.net)
	Ref	Min	Max									
Bulk carrier	Vracier	0-9.999	0	9999	dwt	0	0	0	0	0	0,00	0,00
Bulk carrier	Vracier	10.000-34.999	10000	34999	dwt	0	0	0	0	0	0,00	0,00
Bulk carrier	Vracier	35.000-59.999	35000	59999	dwt	0	0	0	0	0	0,00	0,00
Bulk carrier	Vracier	60.000-99.999	60000	99999	dwt	0	0	0	0	0	0,00	0,00
Bulk carrier	Vracier	100.000-199.999	100000	199999	dwt	0	0	0	0	0	0,00	0,00
Bulk carrier	Vracier	200.000+	200000		dwt	0	0	0	0	0	0,00	0,00
Chemical tanker	Chimiquier	0-4.999	0	4999	dwt	0	0	0	0	0	0,00	0,00
Chemical tanker	Chimiquier	5.000-9.999	5000	9999	dwt	0	0	0	0	0	0,00	0,00
Chemical tanker	Chimiquier	10.000-19.999	10000	19999	dwt	0	0	0	0	0	0,00	0,00
Chemical tanker	Chimiquier	20.000-39.999	20000	39999	dwt	0	0	0	0	0	0,00	0,00
Chemical tanker	Chimiquier	40.000+	40000		dwt	0	0	0	0	0	0,00	0,00
Container	Porte-conteneur	0-999	0	999	teu	0	0	0	0	0	0,00	0,00
Container	Porte-conteneur	1.000-1.999	1000	1999	teu	2	2361	2361	2361	16,2	36434	4,0
Container	Porte-conteneur	2.000-2.999	2000	2999	teu	8	3535	3535	3535	16,1	7514	9,84
Container	Porte-conteneur	3.000-4.999	3000	4999	teu	0	0	0	0	0	0,00	0,00
Container	Porte-conteneur	5.000-7.999	5000	7999	teu	2	7325	7325	7325	14,2	94919	10,90
Container	Porte-conteneur	8.000-11.999	8000	11999	teu	10	108931	108931	108931	14,4	37888	195,37
Container	Porte-conteneur	12.000-14.999	12000	14499	teu	0	0	0	0	0	0,00	0,00
Container	Porte-conteneur	15.000-19.999	15000	19999	teu	4	17992	17992	17992	16,2	194445	74,37
Container	Porte-conteneur	20.000+	20000		teu	0	0	0	0	0	0,00	0,00
General cargo	Cargo	0-4.999	0	4999	dwt	9	3774	3774	3774	2,8	1286	0,39
General cargo	Cargo	5.000-9.999	5000	9999	dwt	4	9294	9294	9294	5,8	2899	0,61
General cargo	Cargo	10.000-19.999	10000	19999	dwt	0	0	0	0	0	0,00	0,00
General cargo	Cargo	20.000+	20000		dwt	0	0	0	0	0	0,00	0,00
Liquefied gas tanker	Citerne de gaz liquéfié	0-49.999	0	49999	cbm	2	26357	26357	26357	12,2	59025	2,66
Liquefied gas tanker	Citerne de gaz liquéfié	50.000-99.999	50000	99999	cbm	2	45472	45472	45472	11,2	54488	5,31
Liquefied gas tanker	Citerne de gaz liquéfié	100.000-199.999	100000	199999	cbm	2	86385	86385	86385	8,4	32986	5,70
Liquefied gas tanker	Citerne de gaz liquéfié	200.000+	200000		cbm	0	0	0	0	0	0,00	0,00
Oil tanker	Pétrolier	0-4.999	0	4999	dwt	0	0	0	0	0	0,00	0,00
Oil tanker	Pétrolier	5.000-9.999	5000	9999	dwt	5	9145	9145	9145	7,8	25303	1,95
Oil tanker	Pétrolier	10.000-19.999	10000	19999	dwt	6	14199	14199	14199	11,5	25039	2,19
Oil tanker	Pétrolier	20.000-39.999	20000	39999	dwt	6	39620	39620	39620	11,7	10396	17,91

Figure 15 Synthèse statistique des données de la flotte française séparées en termes de type et de capacité (source : eye-PI)

Suite à cela, j'ai effectué une nouvelle synthèse, cette fois-ci pour les données mondiales et françaises afin d'agrèger les résultats des navires d'un même type (figure 16). Ainsi, les résultats obtenus fournissent les caractéristiques pour l'ensemble des navires appartenant au même segment de flotte. Cela permet, par exemple, de connaître le poids de chaque type de navire dans les émissions de CO₂ du maritime français mondial.

En ce qui concerne le nombre de navires, les consommations de carburant et les émissions, les résultats issus de la première synthèse ont tout simplement été sommés encore une fois avec la fonction « SOMME.SI.ENS ». En revanche, pour les caractéristiques dont la moyenne avait déjà été calculée, la pondération selon le nombre de navires appartenant à chaque catégorie a dû être considérée pour obtenir les moyennes à l'échelle des différents segments (figure 17).

Segment	Unité	Nombre de nav	Capacité totale (tonnes)	Capacité moyenne (tonnes)	Vitesse moyenne SOG en mer (nœuds)	Distance moyenne naviguée (nm)	Capacité de transport (GT.net)	Consommation Fioul (TWh)	Consommation Diesel (TWh)	Consommation Gaz (TWh)	Consommation Biofuel (TWh)	Consommation Méthanol (TWh)	Consommation Éthane (TWh)	Consommation Éthanol (TWh)	Consommation (TWh)
Segment	Unité	Number of vessels	Total deadweight (tons)	Average deadweight (tons)	Average SOG speed at sea (knot)	Average distance sailed (nm)	Transport Load (GT.net)	Consumption Fuel (TWh)	Consumption Diesel (TWh)	Consumption Gas (TWh)	Consumption Bio-fuel (TWh)	Consumption Methanol (TWh)	Consumption Ethane (TWh)	Consumption Ethanol (TWh)	Fuel consumption (TWh)
Bulk Carrier	dwt														
Chemical Tanker	dwt														
Container	teu	20	2265081	87119	15	91285	218	5,55	0,45						
General Cargo	dwt	13	71142	5472	4	15213	1	0,06	0,41						
Liquefied Gas Tanker	cbm	6	316027	52671	11	46133	14	0,22	0,07	0,36					
Oil Tanker	dwt	29	4260926	146928	11	49298	252	3,39	0,39						
Other Liquids Tankers	dwt														
Ferry Pax	gt	6	16401	2734	15	56597	1	0,49	0,13						
Cruise	gt	8	11053	1362	11	58828	1	0,09	0,44						
Ferry Ro-Pax	gt	16	79398	4962	16	64869	5	1,85	0,30						
Refrigerated Bulk	dwt														
Ro-Ro	dwt	7	48412	6916	13	63909	3	0,31	0,14						
Vehicle Carrier	gt														
Yacht	gt														
Service - Tug	gt														
Miscellaneous - Fishing	gt														
Offshore	gt														
Service - Other	gt														
Miscellaneous - Other	gt														
Total		118	7091929	4698	17	71804	2	0,37	0,42	0,36					

Figure 16 Synthèse statistique des données de la flotte française séparées en termes de type (source : eye-PI)

=SIERREUR(SOMMEPROD(('Synthèse France'!\$B\$5:\$B\$217=\$B5)*('Synthèse France'!\$AK\$5:\$AK\$217=\$AM5)*(SI(ESTNUM('Synthèse France'!\$H\$5:\$H\$217); 'Synthèse France'!\$H\$5:\$H\$217;0))*(SI(ESTNUM('Synthèse France'!\$I\$5:\$I\$217); 'Synthèse France'!\$I\$5:\$I\$217;0)))/SOMME.SI.ENS('Synthèse France'!\$H\$5:\$H\$217; 'Synthèse France'!\$B\$5:\$B\$217; 'Total France'!\$B5; 'Synthèse France'!\$AK\$5:\$AK\$217; 'Total France'!\$AM5; ''))

Figure 17 Exemple de formule Excel pour effectuer la moyenne pondérée permettant d'obtenir les résultats à l'échelle du segment entier (source : eye-PI)

La troisième base de données que j'ai eu l'occasion d'enrichir durant mon stage se concentre sur les différents types de carburants. Cette base est divisée en trois grandes parties : facteurs d'émission, coûts et caractéristiques physiques. Contrairement à la base de données flotte, le travail avait déjà été commencé par un autre stagiaire. Mon rôle a donc été l'ajout de nouvelles données (issues de la littérature scientifique ou d'experts en énergie) au fur et à mesure du stage et la réalisation de statistiques sur ces dernières. Ayant eu à plusieurs reprises l'occasion de lire des articles scientifiques au cours de ma formation, j'ai pu me familiariser avec la structure de ce type de documents, ce qui m'a permis d'être plus efficace dans le recueil de données.

Lorsque l'on parle de carburant alternatif pour la décarbonation du maritime, le facteur d'émission est un élément clé. Dans la base de données, chaque ligne représente un carburant décrit par les caractéristiques suivantes : le nom de la molécule, le type (combustible fossile, carburant de synthèse ou biocarburant), le nom du carburant, le procédé de fabrication, le type de combustion, l'année de la donnée (pouvant être différente de la date de parution de la source) et la zone géographique concernée. Ensuite, pour les valeurs des facteurs d'émission (en $\text{gCO}_2\text{e/kWh}$), on peut distinguer les trois étapes du cycle de vie du combustible : WTT, TTW et WTW. Pour chaque étape, il est renseigné une valeur de référence lorsqu'une seule valeur est disponible et une valeur minimale, maximale, moyenne et médiane, lorsque plusieurs valeurs sont disponibles.

TTW												WTW											
		Minimum		Maximum / Allow		Minimum / Allow		Minimum		Minimum		Maximum / Allow		Maximum / Allow		Minimum / Allow							
Vehicle description	Source	gCO ₂ /t.km	Source	gCO ₂ /t.km	Source	gCO ₂ /t.km	Source	g	Source	g	Source	gCO ₂ /t.km	Source	gCO ₂ /t.km	Source	gCO ₂ /t.km	Source						
Motorcar						241.76	63.50 gCO ₂ /t.km									237.67	63.57 gCO ₂ /t.km						
Motorcar						550.00	136.00 gCO ₂ /t.km	301.64	301.64 gCO ₂ /t.km	100.00	100.00 gCO ₂ /t.km												
Motorcar						550.00	136.00 gCO ₂ /t.km					100.00	100.00 gCO ₂ /t.km										
Motorcar						241.76	63.50 gCO ₂ /t.km					301.64	80.00 gCO ₂ /t.km										
Motorcar						241.76	63.50 gCO ₂ /t.km					301.64	136.00 gCO ₂ /t.km										
Motorcar						241.76	63.50 gCO ₂ /t.km					301.64	136.00 gCO ₂ /t.km										
Motorcar						241.76	63.50 gCO ₂ /t.km					301.64	136.00 gCO ₂ /t.km										
Motorcar						241.76	63.50 gCO ₂ /t.km					301.64	136.00 gCO ₂ /t.km										
Motorcar						241.76	63.50 gCO ₂ /t.km					301.64	136.00 gCO ₂ /t.km										
Motorcar						241.76	63.50 gCO ₂ /t.km					301.64	136.00 gCO ₂ /t.km										
Motorcar						241.76	63.50 gCO ₂ /t.km					301.64	136.00 gCO ₂ /t.km										
Motorcar						241.76	63.50 gCO ₂ /t.km					301.64	136.00 gCO ₂ /t.km										
Motorcar						241.76	63.50 gCO ₂ /t.km					301.64	136.00 gCO ₂ /t.km										
Motorcar						241.76	63.50 gCO ₂ /t.km					301.64	136.00 gCO ₂ /t.km										
Motorcar						241.76	63.50 gCO ₂ /t.km					301.64	136.00 gCO ₂ /t.km										
Motorcar						241.76	63.50 gCO ₂ /t.km					301.64	136.00 gCO ₂ /t.km										
Motorcar						241.76	63.50 gCO ₂ /t.km					301.64	136.00 gCO ₂ /t.km										
Motorcar						241.76	63.50 gCO ₂ /t.km					301.64	136.00 gCO ₂ /t.km										
Motorcar						241.76	63.50 gCO ₂ /t.km					301.64	136.00 gCO ₂ /t.km										
Motorcar						241.76	63.50 gCO ₂ /t.km					301.64	136.00 gCO ₂ /t.km										
Motorcar						241.76	63.50 gCO ₂ /t.km					301.64	136.00 gCO ₂ /t.km										
Motorcar						241.76	63.50 gCO ₂ /t.km					301.64	136.00 gCO ₂ /t.km										
Motorcar						241.76	63.50 gCO ₂ /t.km					301.64	136.00 gCO ₂ /t.km										
Motorcar						241.76	63.50 gCO ₂ /t.km					301.64	136.00 gCO ₂ /t.km										
Motorcar						241.76	63.50 gCO ₂ /t.km					3											

Afin de visualiser la variabilité des données concernant les facteurs d'émissions, j'ai par la suite réalisé une représentation graphique sous forme de boîtes à moustaches. L'objectif était d'avoir, pour les années inférieures à 2025, 2030, 2035, 2040, 2045, et 2050, une boîte à moustaches, le tout pour chaque étape du cycle de vie du combustible et chaque type (fossile, bio et synthétique). De plus, l'objectif était d'avoir, d'une part, une représentation avec toutes les molécules sur une même boîte à moustaches (figure 19) et, d'autre part, l'évolution au fil des années pour une même molécule (figure 20). Pour cela, j'ai utilisé l'outil Excel intégré qui demande que la plage de données constituant les boîtes à moustaches soit continue, ce qui n'était pas le cas des données brutes. J'ai donc opté pour créer une feuille intermédiaire afin de regrouper les données par type et année en utilisant la fonction « SI » qui affiche la valeur du facteur d'émission si la ligne correspond aux critères définis. Ce travail sur les 54 boîtes à moustaches m'a également permis d'utiliser du code VBA (*Visual Basic for Applications*) pour automatiser la couleur et plus globalement la mise en forme de ces dernières.

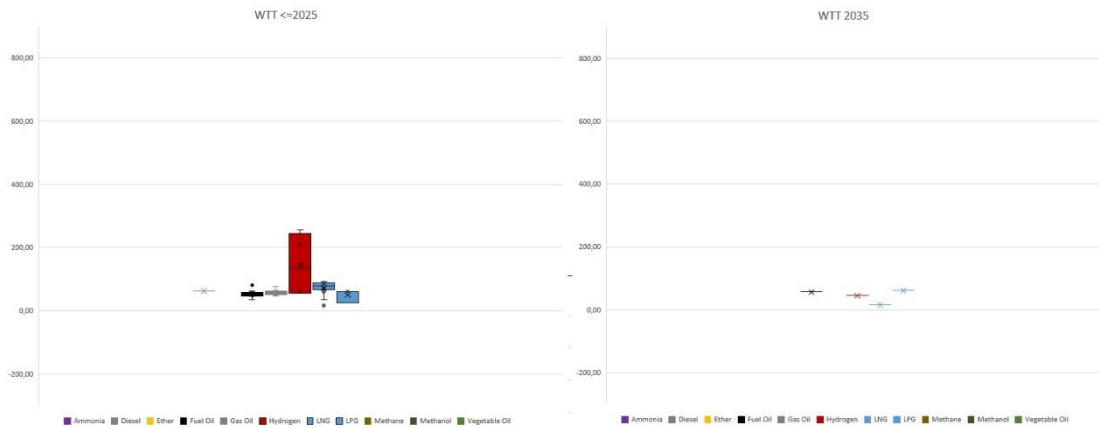


Figure 19 Exemples de boîtes à moustaches pour les combustibles fossiles à l'étape WTT (source : eye-PI)

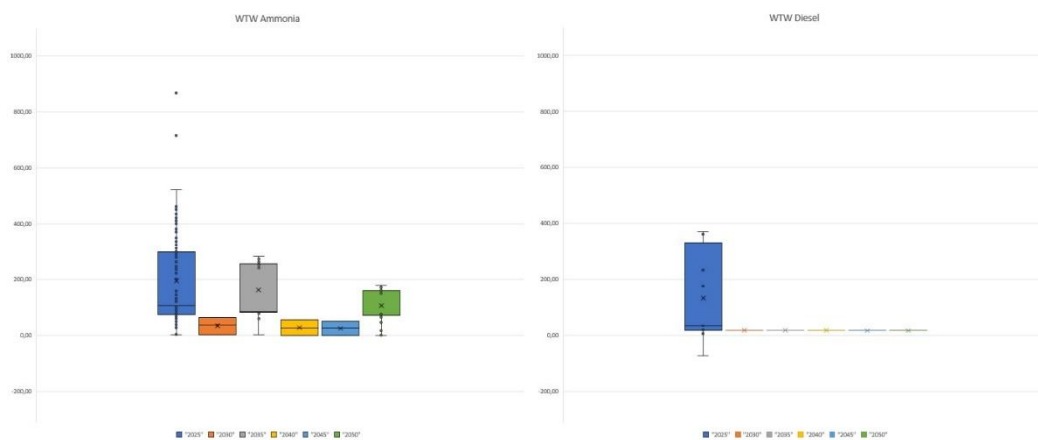


Figure 20 Exemples de boîtes à moustaches pour les carburants synthétiques à l'étape WTW (source : eye-PI)

Pour finir sur la partie facteur d'émission, j'ai réalisé une autre synthèse des résultats, cette fois-ci sous forme de tableaux, des indicateurs de position présents sur une boîte à moustaches : minimum, maximum, moyenne, médiane, premier quartile et troisième quartile (figure 21). Excepté pour la moyenne avec « [MOYENNE.SI.ENS](#) », Excel ne propose pas directement les autres fonctions selon plusieurs critères choisis. La solution a donc été d'utiliser la fonction « filtre » qui renvoie tous les enregistrements selon les critères définis.

	2025	2030	2035	2040	2045	2050
WTT	35.24	57.24	57.24	57.24	57.24	57.24
Minimum	81.00	57.24	57.24	57.24	57.24	57.24
Moyenne	53.91	57.24	57.24	57.24	57.24	57.24
Médiane	51.98	57.24	57.24	57.24	57.24	57.24
Q25%	47.73	57.24	57.24	57.24	57.24	57.24
Q75%	57.24	57.24	57.24	57.24	57.24	57.24
Ecart type	10.60					
Modèle	48.60					
WTW	276.84	288.36	288.36	288.36	288.36	288.36
Minimum	597.00	288.36	288.36	288.36	288.36	288.36
Moyenne	311.14	288.36	288.36	288.36	288.36	288.36
Médiane	292.54	288.36	288.36	288.36	288.36	288.36
Q25%	291.25	288.36	288.36	288.36	288.36	288.36
Q75%	316.22	288.36	288.36	288.36	288.36	288.36
Ecart type	72.89					
Modèle	281.57					
WTW	314.36	345.60	345.60	345.60	345.60	345.60
Minimum	678.00	345.60	345.60	345.60	345.60	345.60
Moyenne	355.89	345.60	345.60	345.60	345.60	345.60
Médiane	345.60	345.60	345.60	345.60	345.60	345.60
Q25%	329.59	345.60	345.60	345.60	345.60	345.60
Q75%	368.60	345.60	345.60	345.60	345.60	345.60
Ecart type	76.52					
Modèle	330.17					
WTW	286.71	345.60	345.60	345.60	345.60	345.60
Minimum	678.00	345.60	345.60	345.60	345.60	345.60
Moyenne	355.89	345.60	345.60	345.60	345.60	345.60
Médiane	329.40	345.60	345.60	345.60	345.60	345.60
Q25%	323.81	345.60	345.60	345.60	345.60	345.60
Q75%	361.83	345.60	345.60	345.60	345.60	345.60
Ecart type	64.18					
WTW	-200.52	-221.40	-266.04	-273.60	-282.24	-294.84
Minimum	-10.68	-10.57	-16.01	-16.45	-17.89	-17.99
Moyenne	-129.97	-133.59	-182.57	-188.42	-194.90	-190.60
Médiane	-163.26	-169.70	-224.62	-231.92	-239.74	-249.40
Q25%	-177.53	-188.68	-238.74	-245.76	-253.32	-263.48
Q75%	-97.53	-134.61	-168.45	-174.48	-181.32	-193.15

Figure 21 Extrait des tableaux de synthèse des facteurs d'émission (source : eye-PI)

Coûts

La deuxième partie de la base de données énergie aborde les coûts de divers combustibles (en €/kWh). Ces derniers sont décrits de la même manière que les facteurs d'émissions et les différentes catégories de coûts sont les suivantes. Premièrement, le coût de production, incluant l'extraction ou la synthèse, la transformation et le raffinage. Deuxièmement, le coût de transport, pour acheminer le carburant depuis son lieu de production jusqu'au port, que ce soit par pipeline, camion, train ou navire. Troisièmement, le coût de soutage, regroupant les opérations de transfert du carburant depuis les installations portuaires vers le navire. Quatrièmement, le coût de stockage, qui inclut le maintien du carburant dans des réservoirs terrestres ou flottants avant sa combustion. Enfin, certaines références que j'ai pu traiter présentaient le coût global du carburant.

Caractéristiques

Le dernier point majeur de la base de données énergie concerne les caractéristiques physiques des carburants. Parmi elles, on retrouve tout d'abord la masse volumique qui exprime la masse du carburant par unité de volume (en kg/m³). Cette information est essentielle car elle permet de savoir combien de masse est contenue dans un réservoir de volume donné. Ensuite, on note la densité énergétique massique, qui correspond à la quantité d'énergie contenue par unité de masse de carburant (en MJ/kg). Enfin, la densité énergétique volumique, quant à elle, exprime l'énergie contenue par unité de volume (en MJ/m³), pour indiquer la quantité d'énergie que peut stocker un réservoir d'un certain volume. Ces trois paramètres complémentaires sont cruciaux lorsque l'on aborde la question du stockage du carburant à bord des navires.

Que ce soit pour les coûts ou les caractéristiques, les mêmes représentations (graphiques par des boîtes à moustaches et sous forme de tableaux) ont été réalisées.

Intégration de données d'Eifer

Parmi les données que j'ai pu intégrer à la base énergie au cours de mon stage, certaines avaient été collectées par Eifer, un institut indépendant de recherche sur l'énergie fondé par EDF. Ces données concernaient des informations sur les facteurs d'émission, les coûts et les paramètres physiques. Mon travail a donc été, dans un premier temps, de retrouver les résultats fournis par Eifer au sein des différents articles scientifiques. Après avoir trouvé, pour certaines données, des résultats différents, j'ai eu l'occasion d'échanger par visioconférence avec un stagiaire d'Eifer pour comprendre l'origine de ces divergences et consolider les calculs des facteurs d'émission.

Base de données divers

La dernière base de données que j'ai constituée au cours de mon stage se nomme la base « divers ». Son but est de regrouper les données collectées qui ne sont pas en lien avec les thèmes des trois bases précédentes : les mesures de décarbonation, les flottes et l'énergie.

D'une part, on retrouve dans cette base des données d'informations issues du document « The Short-Term Cost of Greening the Global Fleet », écrit par Orestis Schinas et Niklas Bergmann. Ce document propose une modélisation de la décarbonation de la flotte maritime mondiale dans l'objectif de réduction des émissions de GES de l'IMO. Les données extraites concernent les caractéristiques des différents segments de flotte : type, âge, nombre de navires, capacité moyenne, et des informations de coûts de construction et de démantèlement (figure 22).

D'autre part, sont présents dans la base de données divers des taux de croissance de certains types de navires. Ces informations sont pertinentes lorsqu'il est question de modéliser l'évolution des flottes dans le temps. On peut alors distinguer la croissance annuelle, la croissance annuelle moyenne et la croissance composée ; ces deux dernières étant calculées sur une période de plusieurs années.

Résultats de la modélisation du cas de base par type de navire						
Données générales			Nombre de navires / Number of vessels	dwt moyen / average dwt	Construction neuve / Newbuild	
Type de navire	Vessel Type	Tranche d'âge en 2020 / Age Group in 2020			Somme (€) / Sum (€)	Par navire / Per vessel
Vraquier	Bulker	>17	1888	53772		
Vraquier	Bulker	12 to 17	1657	69512		
Vraquier	Bulker	7 to 12	5120	75485		
Vraquier	Bulker	2 to 7	2727	80499		
Vraquier	Bulker	~3 to 2	1468	96810	47754640715	32530409,49
Navire-citerne	Tanker	>17	6392	19953		
Navire-citerne	Tanker	12 to 17	2953	51235		
Navire-citerne	Tanker	7 to 12	3466	59814		
Navire-citerne	Tanker	2 to 7	2174	64381		
Navire-citerne	Tanker	~3 to 2	1335	81076	54794905472	41044873,33
Porte-conteneurs	Container	>17	1416	27822		
Porte-conteneurs	Container	12 to 17	1595	43088		
Porte-conteneurs	Container	7 to 12	1227	63416		
Porte-conteneurs	Container	2 to 7	887	83014		
Porte-conteneurs	Container	~3 to 2	575	69568	31906791742	55490072,67

Figure 22 Extrait de la base de données divers sur les coûts liés à la décarbonation de la flotte mondiale (source : Schinas-Bergmann, 2021)

Pour finir, les différentes bases de données étant présentées en anglais et en français, j'ai ajouté dans chaque document Excel, une feuille servant de glossaire avec les termes anglais (issus des documents), et leur traduction en français. La traduction des termes anglais est obtenue avec la fonction « RECHERCHE » d'Excel, qui utilise le glossaire comme table de correspondance. Cela permet donc d'uniformiser les termes de la base et de faire en sorte que, chaque fois qu'une nouvelle ligne est ajoutée dans la base de données, sa traduction soit obtenue automatiquement, à condition que le terme figure dans le glossaire.

En parallèle des bases de données technologies, énergie, flotte et divers, j'ai pu travailler sur une bibliographie, également au format Excel. Cette bibliographie regroupe l'ensemble des articles, rapports, thèses ou tout autre support d'information utile à la décarbonation du maritime. Toute information figurant dans l'une des bases de données est ainsi reliée au document dont elle provient, et parfois même à la page ou à la figure correspondante. Cela permet de garantir la traçabilité et la fiabilité des données collectées mais aussi d'éviter tout doublon.

Respecter minutieusement un format uniforme pour le nom des références et leur typologie était crucial pour permettre un traitement automatisé de la base ultérieurement. J'ai donc à plusieurs reprises durant mon stage répertorié un ensemble de plusieurs documents qui nous parvenaient au fur et à mesure.

Figure 23 Extrait de la bibliographie au format Excel (source : eye-PI)

Modélisation de trajectoires de décarbonation

En parallèle de mon travail sur le recueil et l'intégration de données, j'ai eu l'occasion de travailler sur un programme ayant pour objectif la simulation de trajectoires de décarbonation. En effet, les différents paramètres jouant un rôle dans la réduction des émissions des navires sont soumis à des incertitudes. Les raisons de ces variabilités sont la différence entre les conditions réelles par rapport aux scénarios théoriques, le manque de données et le niveau de maturité faible de certaines technologies. C'est par exemple le cas des facteurs d'émission des carburants alternatifs et des gains d'efficacité énergétique des mesures de décarbonation. Il est donc nécessaire de prendre en compte cette incertitude dans les trajectoires générées par le modèle de décarbonation.

Génération de paramètres aléatoires

Pour représenter la variabilité des données d'entrée (facteurs d'émissions et paramètres d'efficacité énergétique), nous avons utilisé la méthode de Monte-Carlo. Ce principe de simulation vise à calculer une valeur numérique à l'aide de procédés aléatoires et probabilistes. Les paramètres d'entrée sont donc générés suivant une loi de probabilité définie en amont. On peut par exemple générer les paramètres d'entrée selon une loi uniforme, où chaque valeur d'un l'intervalle défini a la même probabilité d'être tirée. L'enjeu est donc de déterminer la loi de probabilité qui représentera le mieux la dispersion des paramètres incertains. D'une part, pour les facteurs d'émissions, les statistiques calculées dans le cadre de la base de données énergie ont été utilisées. Plus précisément, les quartiles (1^{er} quartile, médiane et 3^e quartile) ont été choisis pour caractériser les formes de distribution de plusieurs lois : la loi normale, la loi log normale, la loi gamma, la loi bêta et la loi de Weibull. Ensuite, plusieurs tirages « test » ont été effectués avec chacune de ces lois, et celle possédant la distribution la plus proche des statistiques calculées a été préférée. C'est donc la loi gamma qui a été choisie pour le tirage des paramètres liés au facteurs d'émission des carburants. La loi gamma génère des valeurs selon une distribution en forme de gaussienne, c'est-à-dire que les valeurs au centre de l'intervalle ont une probabilité plus forte d'être tirées (figure 24). La valeur centrale est définie par la médiane (paramètre de position) et la dispersion par le 1^{er} et 3^e quartile (paramètre d'échelle).

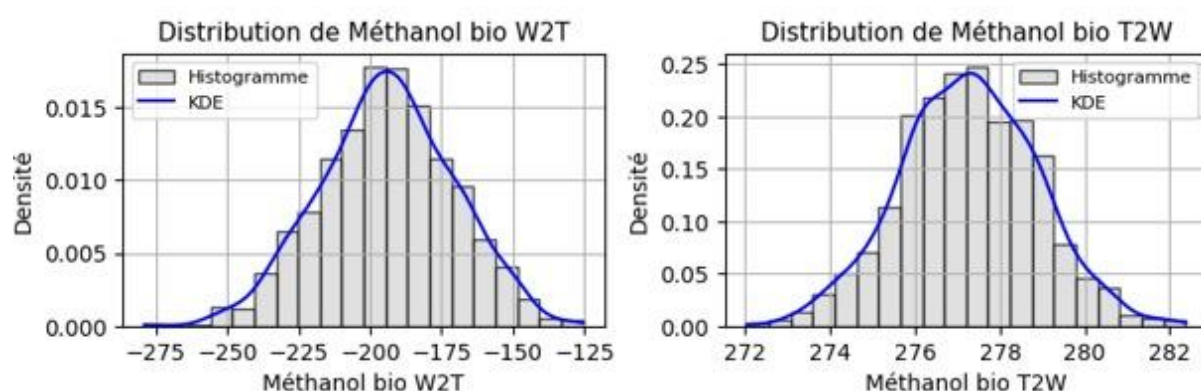


Figure 24 Exemples de distribution de paramètres pour les facteurs d'émission du bio-méthanol en phase WTT et TTW
(source : eye-PI)

D'autre part, les paramètres d'efficacité énergétique ont, eux, été générés à l'aide d'une loi bêta. Cette loi permet de générer des valeurs selon une distribution en cloche, moins resserrée au centre.

Conception de l'algorithme

Actuellement, le modèle de décarbonation du projet CAP2050 est uniquement disponible sous Excel. L'objectif a donc été de créer un programme, en langage Python, pouvant manipuler un fichier Excel afin d'écrire des paramètres dans des cellules définies et lire les résultats après actualisation afin de les extraire.

La démarche pour la conception du programme Python fut de réaliser, dans un premier temps, une preuve de concept. Pour cela, mille triplets de paramètres d'entrée ont été tirés aléatoirement (selon une loi uniforme). À chaque nouveau tirage, des images d'une fonction f (qui dépend des paramètres d'entrée) sont lues par le programme et stockées dans une matrice sous Python. Chaque ensemble d'images représente alors une ligne dans la matrice et une trajectoire qui peut être représentée graphiquement. Une fois l'ensemble des résultats lus, pour chaque triplet de paramètres, des statistiques sont calculées pour déterminer la trajectoire moyenne, médiane, minimale, maximale, ainsi que les quantiles 10% et 90%. Il est alors possible, à l'aide des quantiles, de représenter graphiquement une plage de confiance, où se situent 80% des trajectoires (figure 25). Enfin, pour faciliter le traitement ultérieur, les résultats statistiques ainsi que dix groupes d'images de la fonction (c'est-à-dire dix exemples de trajectoires générées) sont exportés dans un nouveau fichier Excel.

Une fois la version preuve de concept testée et validée, le programme Python a été adapté pour manipuler le modèle de décarbonation de CAP2050. Cette fois-ci, ce n'était pas trois paramètres mais une vingtaine qui étaient générés à chaque itération (facteurs d'émission et mesures d'efficacité énergétique). De plus, la génération de paramètres se faisait maintenant selon deux lois distinctes : gamma et bêta, comme évoqué précédemment. Enfin, les résultats lus par le programme n'étaient plus les images d'une fonction f , mais les émissions absolues de CO₂ et le besoin en énergie.

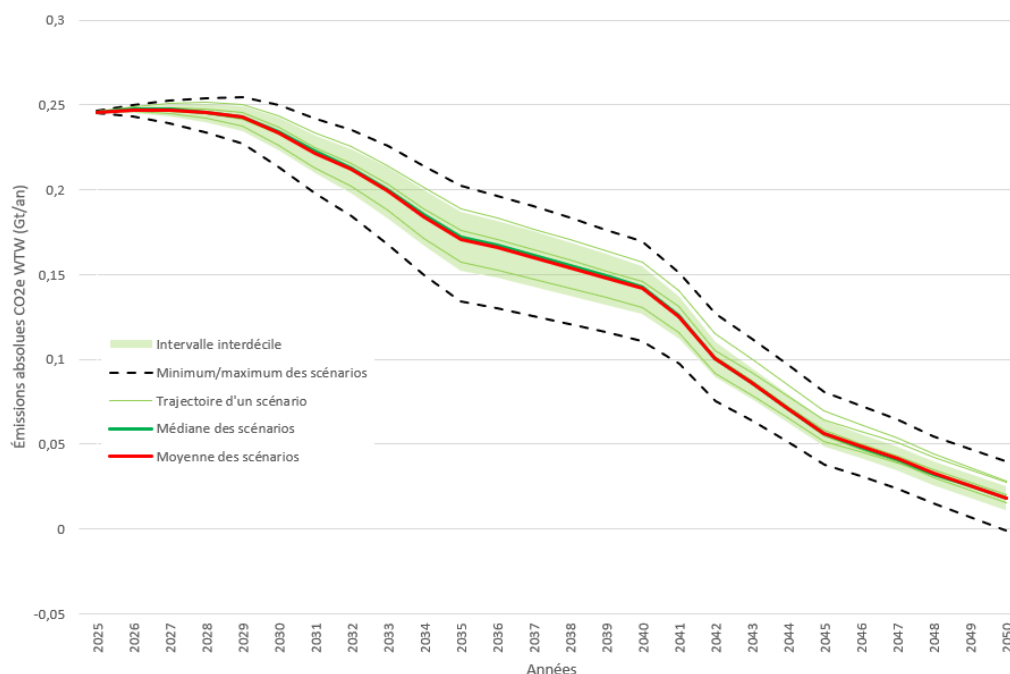


Figure 25 Résultats graphiques d'une simulation de l'évolution des émissions de CO₂ selon la méthode Monte-Carlo avec le programme Python et pour le segment de flotte vraquiers (source : eye-PI)

Les trajectoires ainsi calculées par le programme permettent d'avoir une vision d'ensemble des différents scénarios possibles, en considérant l'incertitude des données, et permettent d'aider à la prise de décisions.

```

55 def manipule(feuille_resultats_1, feuille_resultats_2):
56     resultats_1 = []
57     resultats_2 = []
58     app = xw.App(visible=False)
59     wb = app.books.open(fichier_excel)
60
61     for params in jeu_parametres:
62         ws_param = wb.sheets[feuille_parametres]
63
64         # écriture des paramètres
65         for cle, valeur in params.items():
66             if cle in cellules_parametres:
67                 cellule = cellules_parametres[cle]
68                 ws_param.range(cellule).value = valeur
69
70     wb.app.calculate()
71
72     # lecture des deux pages dans deux feuilles différentes
73     ws1 = wb.sheets[feuille_resultats_1]
74     valeurs1 = ws1.range("K7:K32").value
75
76     ws2 = wb.sheets[feuille_resultats_2]
77     valeurs2 = ws2.range("AL7:AL32").value
78
79     resultats_1.append(valeurs1)
80     resultats_2.append(valeurs2)
81
82     wb.close()
83     app.quit()
84
85     # Transformation en DataFrame
86     matrice_1 = pd.DataFrame(resultats_1)
87     matrice_2 = pd.DataFrame(resultats_2)
88     return matrice_1, matrice_2

```

Figure 26 Extrait du programme Python pour la génération de trajectoires de décarbonation (source : eye-PI)

Étant donné que le programme Python s'appuyait sur le fichier Excel pour effectuer les calculs, l'exécution du programme était parfois très longue et pouvait durer plusieurs heures. En effet, plus le nombre de paramètres en entrée, de tirages et de résultats à lire en sortie était élevé, plus le temps nécessaire au programme pour aboutir était long. Ainsi, le plus grand nombre de tirages ayant été générés a été dix mille, pour un temps d'exécution de plus de cinq heures. Ce nombre de tirages de jeux de paramètres permettait de garantir l'exhaustivité des trajectoires simulées. Bien qu'il eût été plus efficace, en termes de temps, d'intégrer directement les formules dans le programme Python, la complexité du fichier Excel (impliquant de nombreuses dépendances entre les cellules pour arriver au résultat) aurait rendu le travail trop long comparé au temps alloué par le stage.

La première application du modélisateur de trajectoires, à l'échelle de la flotte mondiale, avait pour objet les principaux émetteurs, à savoir les vraquiers, les porte-conteneurs, les pétroliers et les navires-citernes, qui représentent à eux seuls 80% des émissions du maritime mondial (figure 27). Pour alimenter le modèle, les données concernant les navires telles que les capacités moyennes, les consommations de carburant ou les émissions de CO₂, ont été récupérées dans la base de données flotte évoquée plus tôt. De même, les gains d'efficacité énergétique et les facteurs d'émission utilisés pour la simulation provenaient respectivement de la base de données énergie et technologies.

Tableau 5 – Émissions des principaux types de navires (d'après [12])			
Émissions	Part dans les émissions internationales	Part dans le transport international	Équivalent en émissions nationales en 2019
Porte-conteneurs			
183,64 Mt CO ₂	29,9 %	20,9 %	Espagne (251 Mt CO ₂)
Vraquiers			
169,15 Mt CO ₂	27,6 %	41,5 %	Pays-Bas (154 Mt CO ₂)
Navires-citernes (oil & chemicals)			
129,86 Mt CO ₂	21,1 %	29,3 %	Philippines (140 Mt CO ₂)

Figure 27 Émissions des principaux types de navires (Sigrist et al., 2023)

Retour d'expérience

Au cours de mon stage, j'ai été impliqué dans différentes tâches liées à la décarbonation du transport maritime, en particulier la collecte, l'organisation et l'exploitation de données techniques. La constitution et l'enrichissement des bases de données a nécessité une rigueur importante afin de garantir leur lisibilité et leur réutilisation par d'autres personnes, dans le cadre de traitements ultérieurs. Ce point m'a permis de développer mes compétences en structuration de l'information et en gestion de données.

De plus, le fait de disposer régulièrement d'une vision claire sur les étapes de travail à venir a facilité l'organisation de mes tâches et favorisé une grande autonomie dans mon travail. Cette expérience s'est déroulée à la fois en présentiel et en distanciel, ce qui était une première pour moi sur le plan professionnel. Ce mode de travail a encore une fois renforcé mes capacités à m'organiser de manière autonome.

J'ai également collaboré avec un autre stagiaire d'eye-PI, originaire de Malaisie et basé à Nantes, sur la création et la mise en forme des bases de données. Nos échanges, en anglais, ont représenté un apprentissage significatif. En effet, comprendre et se faire comprendre, tant à l'oral qu'à l'écrit, dans un contexte professionnel, est une compétence que j'ai pu développer au fil du stage.

Enfin, j'ai participé à plusieurs réunions durant mon stage, que ce soit avec des armateurs ou des experts en données maritimes. Ces échanges ont permis d'appliquer les notions et données que j'avais pu recueillir ou assimiler, à des cas concrets, opérationnels et spécifiques.

Par ailleurs, lors d'une réunion, j'ai eu l'opportunité de présenter à un armateur français, le fonctionnement du programme Python de modélisation de trajectoires que j'ai développé. Cela m'a permis de travailler ma capacité à synthétiser des informations techniques et à les rendre accessibles à un public non spécialiste de modélisations numériques.

Conclusion

Pour conclure, mon stage de 4^{ème} année au sein de la société eye-PI, a constitué une expérience concrète dans le milieu de la recherche scientifique. Étant ma première expérience professionnelle du métier d'ingénieur, elle m'a permis de développer des compétences à la fois techniques (collecte, structuration et modélisation de données) et transversales (communication en anglais, travail en autonomie, collaboration à distance).

Sur le plan personnel, bien que le domaine maritime ne soit pas celui vers lequel je souhaite me diriger, beaucoup de leviers d'action pour la décarbonation se retrouvent également dans les autres moyens de transport (carburants alternatifs, mesures d'efficacité énergétique ou mesures opérationnelles).

Ce stage m'a donc permis de découvrir le monde des mobilités décarbonées à travers la recherche et développement. De plus, cette expérience en tant qu'assistant d'ingénieur m'a appris à gérer des bases de données conséquentes avec rigueur et à établir des modèles de simulation, encore une fois applicables à n'importe quel domaine. Les connaissances et méthodes de travail que j'ai pu acquérir au cours de ce stage pourraient ainsi être appliquées à des projets liés au transport ferroviaire, routier ou urbain, contribuant ainsi à la conception de systèmes de mobilité durables et résilients.

Bibliographie

Balcombe et al., *How to decarbonise international shipping: Options for fuels, technologies and policies* (2019) disponible sur :

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0196890418314250>

Bouman et al., *State-of-the-art technologies, measures, and potential for reducing GHG emissions from shipping – A review* (2017) disponible sur :

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1361920916307015>

DNV, *Energy-Efficiency measures and technologies* (2025), disponible sur :

<https://www.dnv.com/maritime/publications/energy-efficiency-report-download/>

Institut MEET2050, *MEET2050, Institut national de la décarbonation du maritime* (2025), disponible sur :

<https://meet2050.org/>

International Maritime Organization (IMO), *Fourth Greenhouse Gas Study* (2020), disponible sur :

<https://www.imo.org/en/ourwork/Environment/Pages/Fourth-IMO-Greenhouse-Gas-Study-2020.aspx>

Schinas-Bergmann, *The Short-Term Cost of Greening the Global Fleet* (2021), disponible sur :

<https://www.mdpi.com/2071-1050/13/16/9439>

Sigrist et al., *Transition énergétique du maritime - Enjeux, défis et moyens d'action* (2023), disponible sur :

<https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/ingenierie-des-transports-th14/transport-et-enjeux-environnementaux-42721210/transition-energetique-du-maritime-trp5042/>



Rapport de stage individuel : Données et modèles pour la décarbonation du maritime

Résumé :

Ce rapport décrit le déroulé de mon stage au sein de la société eye-PI, spécialisée dans l'expertise scientifique et technique, pour les domaines du naval, du maritime et de l'énergie. Le sujet de mon stage est la décarbonation du secteur maritime dans le cadre du projet CAP2050, porté par l'institut national MEET2050. Dans un premier temps, nous verrons, le poids du maritime dans l'économie mondiale, les méthodes de calcul et les réglementations concernant les émissions de gaz à effet de serre. Ensuite, l'institut MEET2050, le projet CAP2050 et la société eye-PI seront présentés. Par la suite, le contenu de mon stage sera vu en détail. D'une part, le travail de recueil d'informations et de structuration de plusieurs bases de données sera abordé. D'autre part, la conception d'un programme de modélisation de trajectoires de décarbonation et son application seront expliquées. Enfin, un retour d'expérience sera présenté afin d'évoquer les compétences acquises et les enseignements tirés de ce stage.

Mots Clés :

Décarbonation, transport maritime, bases de données, recherche et développement, modélisation numérique

Entreprise d'accueil :

eye-PI - 4, place Foire le Roi 37000 TOURS

Tuteur entreprise :

Jean-François Sigrist

Ingénieur, docteur en sciences de l'ingénieur
et habilité à diriger les recherches

Tuteur académique :

Marina Vinot