






REFROIDISSEMENT D'UNE PILE À COMBUSTIBLE PAR IMMERSION DANS UN FLUIDE DIPHASIQUE

 LTEN – Laboratoire de Thermique et Énergie de Nantes	 Encadrement : Nicolas BAUDIN
 Du 04 mars au 03 septembre 2024 (durée : 6 mois)	 Financement : CARGO
 Stagiaire : Jean DAOUD	

Problématique et état de l'art

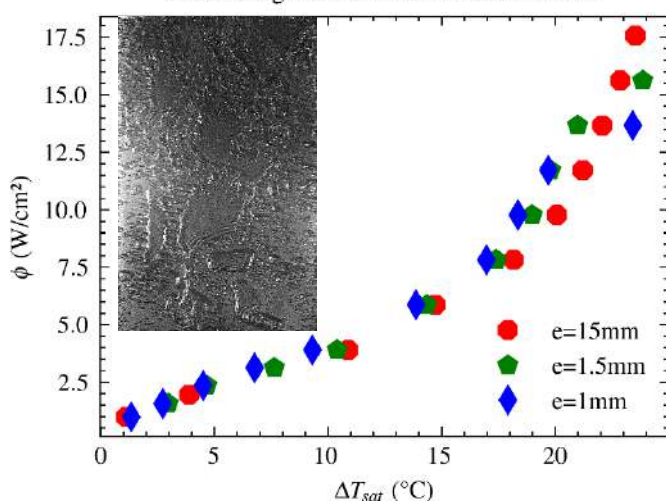
Il est essentiel de procéder à un refroidissement efficace des piles à combustible et des batteries, afin de maintenir leur durée de vie et leur efficacité. L'immersion dans un liquide diélectrique à température de saturation faible, bien qu'elle soit efficace et sûre, pose des défis dus au confinement de l'ébullition : les phénomènes ne sont pas encore bien expliqués, notamment l'apparition de régimes instables. La modélisation actuelle présente des lacunes, ce qui requiert des modèles plus précis et validés afin d'améliorer l'efficacité de cette technologie dans le domaine maritime.

Méthodologie

Les essais ont été réalisés avec une cellule d'essai qui consiste en deux plaques chauffantes respectivement horizontale et verticale qui représentent la géométrie d'une pile à combustible. En face de la plaque chauffante verticale, une surface en verre remplit deux fonctions : observer les phénomènes dans le canal vertical et agir comme paroi de confinement, similaire à une paroi du conteneur du système de refroidissement. Les plaques chauffantes sont munies de thermocouples pour mesurer les températures et flux en surface. Le fluide diélectrique utilisé pour les tests est le 3M Novec 7000, qui a une température de saturation de 34 °C à pression atmosphérique. Une caméra rapide est placée en face de la plaque verticale pour prendre des images dans le but d'analyser dans le futur les images à différents flux et différents confinements et corrélérer la taille des bulles, leurs vitesses, leur fréquences... avec le flux de chaleur évacué.

Résultats

Free boiling curve at different confinements.



La variation du confinement et les mesures à différents puissances électriques ont permis de calculer le flux évacué et de tracer le flux (W/cm²) en fonction de ΔT (°C) entre la température de la surface chauffée et T_{sat} du réfrigérant.

On observe que le confinement améliore la dissipation de la chaleur si on parle de bas à moyen flux. Lorsqu'on atteint des flux élevés, on aura une mauvaise dissipation du flux de chaleur en confinant puisqu'on atteindra l'assèchement plus vite : une couche de vapeur se forme rapidement entre la plaque chauffante et le fluide réfrigérant ce qui empêche une bonne dissipation de chaleur. Ce phénomène est appelé "Film Boiling".

Conclusion, perspectives

Tester de nouveaux réfrigérants binaires écologiques est essentiel puisque le Novec 7000 est un PFAS, avec une longue durée de vie et des effets sur l'environnement potentiellement néfastes. De plus, il y a besoin d'aller plus loin, et notamment d'analyser les images obtenues pour caractériser différentes grandeurs (taux de vide, vitesse liquide/vapeur) et les corrélérer avec les résultats thermiques des essais expérimentaux.

Lien à la feuille de route nationale de décarbonation du maritime (axes et leviers) :



Technos zéro émission



Électrification

MODELISATION MULTIPHYSIQUE DE LA PILE A COMBUSTIBLE PEMFC



IREENA – Institut de Recherche en Énergie
Électrique de Nantes Atlantique



Encadrement : Yasser DIAB (IREENA)



Du 19 février au 21 août 2024 (durée : 6 mois)



Co-encadrement : Bruno AUVITY (LTEN)



Stagiaire : Mansour Sy BA



Financement : IUML / CARGO

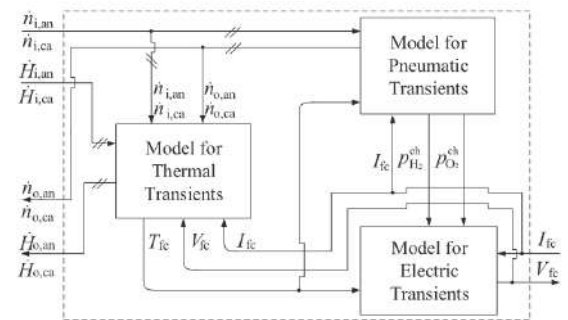
Problématiques, défis, enjeux

- La compréhension des **réactions électrochimiques** dans une **PEMFC** est complexe, car elle implique des facteurs tels que la **température**, la **pression** et le **catalyseur**, ainsi que des phénomènes tels que la diffusion des espèces réactives, la conductivité ionique et électronique, la perméabilité des gaz et la porosité.
- Modéliser les réactions dans la PEMFC est un vrai défi qui nécessite des modèles multi-échelles et des techniques expérimentales avancées.
- Dans le cadre de l'utilisation des piles à combustible PEMFC dans un système **multi-source** à grande échelle tel que le **transport maritime à Saint-Nazaire**, l'objectif de ce travail est de développer un **modèle multiphysique** permettant une gestion optimisée de l'énergie dans ce système multi-source.

Méthodologie

Développement d'un modèle multiphysique intégrant trois sous-modèles: **électrique, thermique et pneumatique**.

- La partie électrique utilise un réseau RC pour représenter les phénomènes d'activation, de concentration et ohmiques, avec des résistances, une **capacité double couche**, et la tension réversible basée sur **les paramètres électrochimiques**.
- La partie thermique repose sur l'équation de **transfert de chaleur**, prenant en compte la chaleur générée par les réactions chimiques, celle consommée et les échanges par **convection** entre les cellules du stack.
- La partie pneumatique utilise l'équation $PV=nRT$ pour relier les **pressions** et **débits d'entrée**, de sortie et des réactions des réactifs (**hydrogène, oxygène**) et du produit (**eau**).



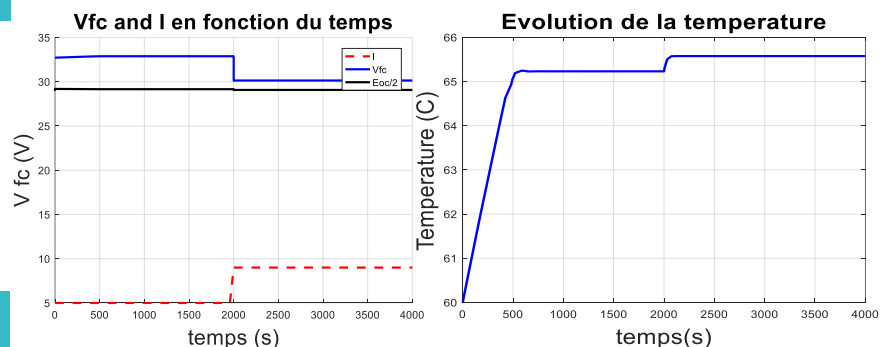
$$V_{fc} = E_{oc} - V_{act} - V_{con} - V_{ohm}$$

$$\frac{dT}{dt} = \frac{1}{M_{fc} \cdot C_{th}} \left(\frac{dQ_c}{dt} - \frac{dQ_E}{dt} - \frac{dQ_L}{dt} \right)$$

$$\frac{dP}{dt} = \frac{RT}{V} (\dot{m}_{inlet} - \dot{m}_{outlet} - \dot{m}_{reaction})$$

Résultats

Le modèle développe le **comportement transitoire** de la PEMFC autour du **point de fonctionnement**, représentant la tension totale aux bornes pour des **charges variables** et l'évolution de la température avec un système de refroidissement.




Conclusion, perspectives

Un modèle multiphysique a été développé, et l'**identification des paramètres** est en cours de réalisation expérimentalement. Ce modèle sera appliqué à une pile réelle avec une charge variable et un système de gestion thermique. Cette approche optimise les performances en conditions réelles en prenant en compte les variations de charge et les besoins thermiques.



MARINISATION DES PILES A COMBUSTIBLES SOFC POUR LA MOBILITE MARITIME

 Institut des Matériaux de Nantes Jean Rouxel	 Encadrement : Annie LE GAL LA SALLE (IMN)
 Du 1 ^{er} mars au 27 juillet 2024 (durée : 5 mois)	 Co-encadrement : Stefan HENFLING (IMN, CEA)
 Stagiaire : Ahmed BENAMAR	 Financement : CARGO

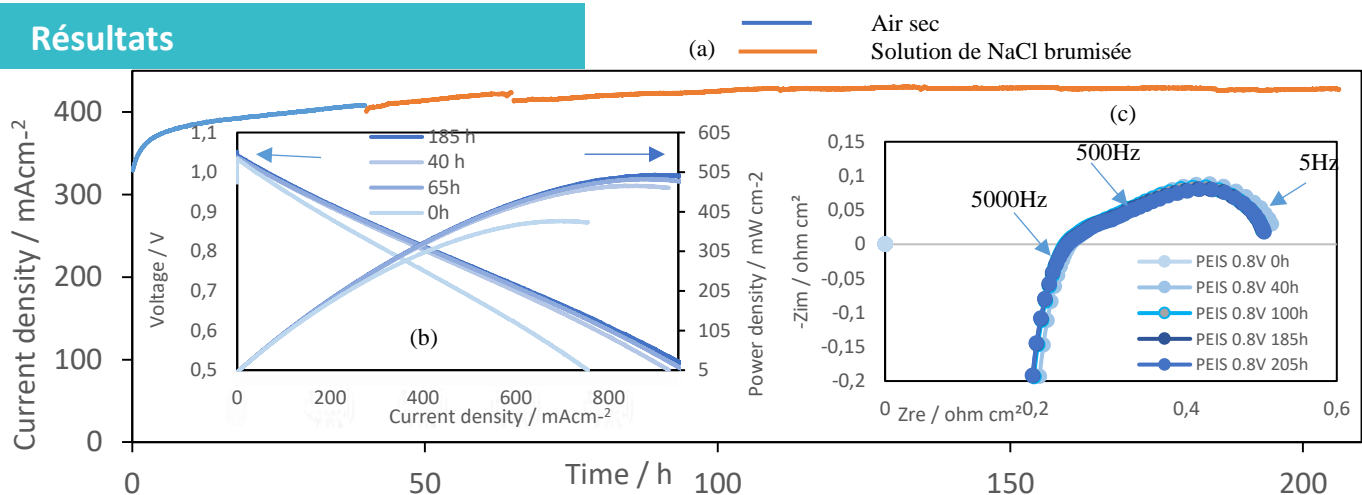
Problématique et état de l'art

Ce stage vise à évaluer l'impact des polluants présents dans l'air marin sur le fonctionnement des piles à combustible SOFC (Solid Oxide Fuel Cell). Ces piles, fonctionnant à haute température, nécessitent un combustible et de l'oxygène pour générer de l'électricité. Le travail portait sur l'étude des performances électrochimiques et de la durabilité des composants de la cellule, tant dans des conditions standard qu'en présence de polluants marins dans l'air alimentant la pile.

Méthodologie

Le travail expérimental a débuté par des tests de référence réalisés en utilisant des cellules SOFC dans des conditions standards (utilisation d'hydrogène pour l'électrode de combustible et d'air pur pour l'électrode à air). Ensuite, nous avons introduit de l'air humidifié et de l'air marin avec différentes concentrations de sel. En parallèle des tests sur des cellules complètes, nous avons examiné la compatibilité des sels marins avec les matériaux de cathode couramment utilisés pour identifier les matériaux les plus résistants à l'exposition aux sels marins.

Résultats



Evolution du courant au cours du temps (a) et des courbes de polarisation (b) et diagrammes d'impédance tracés à 0,8V (c), d'une cellule maintenue 0,8V, avant ($t < 40h$) puis après ($t \geq 40$) passage sous brume marine.

Le matériau de cathode $La_{0,6}Sr_{0,4}Co_{0,2}Fe_{0,8}O_{3-x}$ (LSCF) permet une bonne stabilité de la densité de courant dans des conditions standards et sous exposition à l'air marin.

Conclusion, perspectives

L'impact des polluants marins sur une cellule SOFC intégrant LSCF comme matériau de cathode a été évalué : **LSCF s'avère un matériau résistant**, ce que confirment les résultats de réactivité entre LSCF et les constituants de l'air marin, non détaillés ici. Ces études doivent être complétées dans des conditions de tests encore plus sévères (effets d'autres polluants sur LSCF, irrégularités d'alimentation et de chauffage) mais aussi avec de nouveaux matériaux. Une collaboration avec l'industrie maritime est également nécessaire pour tester les SOFC en conditions réelles d'utilisation, mais aussi satisfaire aux normes réglementaires encore en cours d'élaboration.

Lien à la feuille de route nationale de décarbonation du maritime (axes et leviers) :



Technos zéro émission



Électrification

IMPLEMENTATION DE MATERIAUX A TRANSITION DE PHASE DANS LES PILES A COMBUSTIBLES SOFC

LHEEA – Hydrodynamique, Energétique et Environnement Atmosphérique

Encadrement : Ernesto MURA

Du 12/02/2024 au 8/08/2024 (durée : 6 mois)

Financement : LHEEA

Stagiaire : Riccardo GALLERANI

Problématique et état de l'art

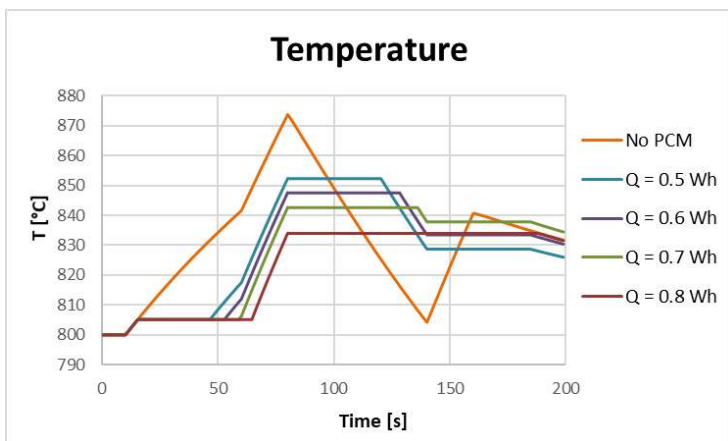
Les piles à combustible à oxyde solide (SOFC), connues pour leur haute efficacité et leur flexibilité en termes de carburant, font face à des **défis liés à la gestion thermique, notamment dans des conditions dynamiques telles que les variations de charge et les arrêts**. Les températures de fonctionnement élevées (entre 600°C et 1000°C) nécessitent une gestion thermique efficace pour prévenir les contraintes thermiques non uniformes et la dégradation des composants de la pile.

Cette étude examine **l'utilisation de matériaux à changement de phase métalliques (mPCM)**, qui offrent une conductivité thermique supérieure par rapport aux PCM conventionnels. En incorporant des mPCM dans la pile SOFC, il est possible de réduire les variations de température drastiques et d'améliorer le préchauffage des entrées de carburant et d'air.

Méthodologie

Un modèle complet de pile SOFC a été développé à l'échelle de la cellule, intégrant à la fois des aspects électrochimiques et thermiques pour prédire les performances de la pile. Ce modèle prend en compte les comportements en régime permanent et dynamique, garantissant une compréhension approfondie du fonctionnement des SOFC dans diverses conditions.

Résultats



Lorsqu'un signal de courant est utilisé comme entrée pour simuler des conditions de travail dynamiques, les résultats indiquent que **l'utilisation de mPCM entraîne une réduction significative des gradients de température lors des variations de charge**. Cette réduction est due à l'accumulation et à la libération de chaleur par le PCM. Lors des augmentations de charge, l'excès de chaleur est absorbé par le PCM, maintenant une température constante de la pile. À l'inverse, lors des diminutions de charge, la chaleur est libérée par le PCM.

Plus le "Q" (énergie stockable dans le PCM) est élevé, plus le gradient thermique sera faible. Dans la figure, on peut

apprécier le bénéfice apporté par l'implémentation de deux différents PCM.

Conclusion, perspectives

La **stabilité thermique accrue** démontrée par les résultats suggère la **possibilité d'utiliser des SOFC dans des conditions de fonctionnement dynamiques**, en offrant une solution viable pour réduire les émissions dans le secteur du transport maritime. Les futures études se concentreront sur l'adaptation du modèle à un stack SOFC et la comparaison des mPCM existants utilisés comme tampons thermiques dans la pile. De plus, des tests expérimentaux seront réalisés pour analyser le comportement thermique d'une pile et valider le modèle.

[Lien à la feuille de route nationale de décarbonation du maritime \(axes et leviers\) :](#)








Technos zéro émission



Électrification

DECARBONATION DES TRANSPORTS AMONT/AVAL : PROJET DE HUB MULTI-ENERGETIQUE PORTUAIRE

	LEMNA – Laboratoire d'Économie et Management de Nantes Atlantique		Encadrement : Virginie ANDRE (LEMNA)
	Du 4 mars au 4 septembre 2024 (durée : 6 mois)		Co-encadrement : Nathalie BOSTEL (LS2N), Didier BEDE (LGTO)
	Stagiaire : Flavian FERRATON	€	Financement : IUML / CARGO

Problématique et état de l'art

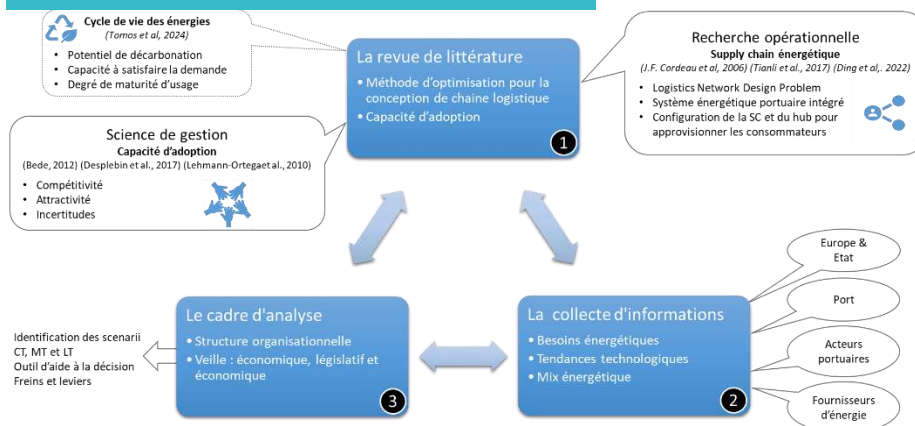
L'estuaire de la Loire est un point névralgique, assurant 10% de l'approvisionnement énergétique français, avec 70% des trafics du Grand Port maritime de Nantes Saint-Nazaire aujourd'hui liés aux énergies fossiles. Le port fait face à un défi majeur : la transition énergétique (neutralité carbone en 2050). Le port et ses nombreux acteurs forment un écosystème complexe nécessitant une stratégie énergétique.

Comment projeter l'organisation actuelle des flux vers la décarbonation des activités portuaires ?

Les objectifs sont : d'accompagner les acteurs vers la décarbonation des activités et transports, de proposer des visions transitoires à court, moyen et long termes, et d'organiser une supply chain énergétique autour d'un hub portuaire.

Les travaux de (Cordeau, 2008) développent un outil d'aide à la décision pour optimiser les réseaux de supply chain. (Song, 2020) propose un cadre pour modéliser un système énergétique portuaire répondant à la demande énergétique.

Méthodologie



La démarche se décline en trois axes :

- (1) Une revue de la littérature en science de gestion et recherche opérationnelle.
- (2) la collecte d'informations via des entretiens.
- (3) Un cadre d'analyse afin d'élaborer des scénarios énergétiques et proposer un outil méthodologique et stratégique pour la création d'un hub multi-énergétique portuaire.

Résultats

La compétitivité (Bede, 2012), l'attractivité (Desplebin & Houllier-Guibert, 2017) et l'incertitude (Lehmann-Ortega & Moingeon, 2010) permettent de définir la "capacité d'adoption" des acteurs. Ces travaux sont axés sur les Réseaux Territoriaux d'Organisation (RTO). Ils ont pour objectif de consolider notre cadre d'étude avec les entretiens qui seront à mener auprès des acteurs clés de l'estuaire.

Conclusion, perspectives

La création d'un hub multi-énergétique portuaire nécessite, dans un premier temps, une analyse approfondie des besoins énergétiques. Les "capacités d'adoption" technologiques et énergétiques des acteurs permettront une meilleure compréhension pour la construction de "supply chain énergétique" et d'un outil d'aide à la décision.

En perspectives, deux études distinctes et complémentaires sont nécessaires pour mener ces recherches approfondies, proposer des solutions innovantes, et assurer l'accompagnement des acteurs vers la décarbonation.

Lien à la feuille de route nationale de décarbonation du maritime (axes et leviers) :



ÉTUDE D'UN SYSTEME HYBRIDE D'ALIMENTATION ELECTRIQUE A QUAÏ POUR NAVIRES

-
-
-

Problématique et état de l'art

- Décarbonation du transport maritime
- Modernisation des zones portuaires

(cf. Règlement AFIR – Alternative Fuels Infrastructure – de l'UE : connexion électrique obligatoire des navires à quai d'ici 2030)

Objectif : la conception et le pilotage des chaînes de conversion d'électronique de puissance pour des alimentations électriques portuaires.

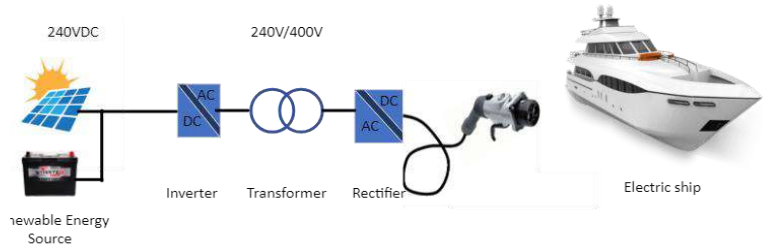


Fig.1 - Alimentation électrique à quai

Bakar, Nur Najihah Abu, et al. "Electrification of onshore power systems in maritime transportation towards decarbonization of ports: A review of the cold ironing technology." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 178 (2023): 113243.

Méthodologie

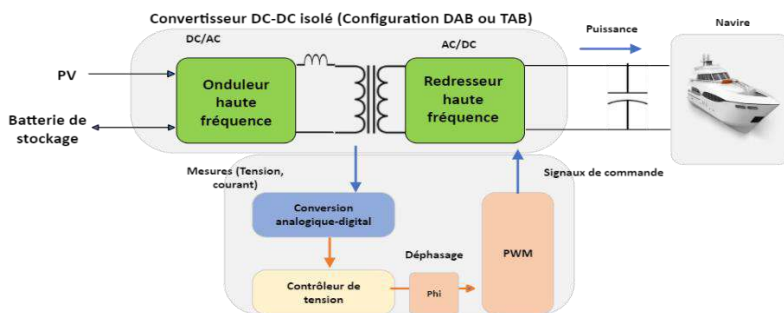


Fig. 2 – Configuration du convertisseur multiport

- État de l'art des architectures de conversion d'électronique de puissance ;
- Dimensionnement des principaux composants ;
- Synthèse des lois de commande (régulateur PI) ;
- Simulation sur Matlab/Simulink.

Résultats

Simulation d'une alimentation à quai de 10 kW/400V basée sur un convertisseur Dual Active Bridge (DAB) avec modulation SPS (Single Phase Shift). $V_i = 240V$; $V_0 = 400V$; $L=10\mu H$.

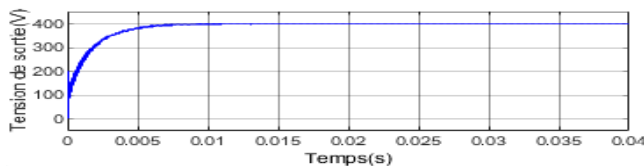


Fig.3 – Tension de sortie de l'Alimentation

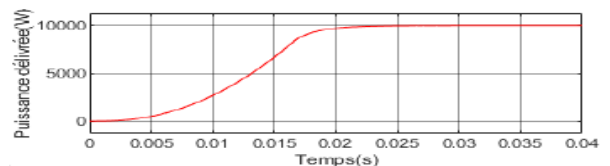


Fig.4 - Puissance de sortie


Conclusion, perspectives

Les résultats de simulation obtenus montrent le **potentiel du convertisseur DAB** à augmenter le niveau de tension de la source d'énergie tout en assurant l'isolation galvanique. Ce travail ouvre des perspectives intéressantes pour l'intégration du DAB dans des applications marines et autres systèmes nécessitant une conversion de puissance efficace.

Lien à la feuille de route nationale de décarbonation du maritime (axes et leviers) :



IMPACTS DES TENSIONS POLITIQUES SUR LE COUT DU FRET

 LEMNA – Laboratoire d'Économie et de Management de Nantes Atlantique	 Encadrement : Rodica LOISEL (LEMNA)
 Du 1 ^{er} février au 31 juillet 2024 (durée : 4 mois)	 Co-encadrement : Pierre MARTY (LHEEA)
 Stagiaire : Martin ROUX	 Financement : IUML / CARGO

Problématique et état de l'art

L'indice de risque géopolitique de Caldara et Iacoviello (2022) montre une **corrélation entre les tensions géopolitiques et le prix du fret**. Récemment, les attaques en mer rouge ont contraint les navires à modifier leur itinéraire pour les lignes reliant l'Europe du Nord ou la Méditerranée à l'Asie. A travers le développement d'un calculateur, le stage vise à **évaluer l'incidence de l'augmentation de la distance, pour éviter les zones à risque, sur l'évolution du coût du fret**.

Caldara & Iacoviello (2022), *Measuring Geopolitical Risk, American Economic Review* 112(4):1194-1225.

Méthodologie

Création sous Excel d'un **calculateur du coût du fret** par conteneur et des émissions de CO₂ générées par voyage. Relativement simple d'utilisation, le calculateur tient compte de nombreux paramètres : les coûts du voyage (ici coût opérationnel de court terme), les données de ligne comme la distance, les escales et la durée du voyage, ainsi que les données spécifiques au navire, notamment la capacité ou encore la vitesse.

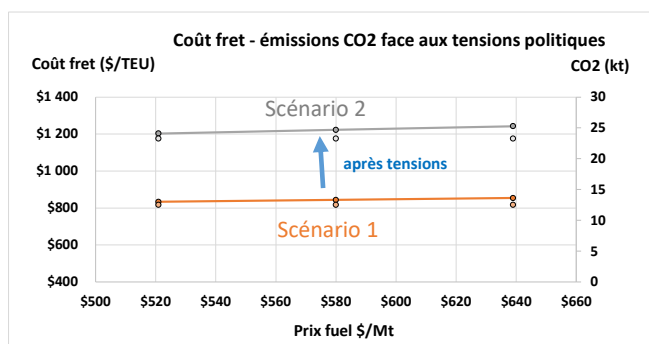
Le calculateur a ensuite été utilisé pour comparer deux scénarios :

- Le scénario 1 (*en orange dans le graphique ci-dessous*) correspond au trajet initial du navire Benjamin Franklin de la compagnie CMA-CGM passant par le canal de Suez.
- Le scénario 2 (*en gris*) étudie le nouvel itinéraire de ce navire par le cap de Bonne-Espérance.

Résultats

prix du fuel	Sans tensions		Avec tensions	
	Box price	CO ₂ (Mt)	Box price	CO ₂ (kt)
\$ 521	\$ 834	13	\$ 1 203	23
\$ 580	\$ 844	13	\$ 1 223	23
\$ 639	\$ 854	13	\$ 1 243	23

On observe une **hausse du coût par conteneur de 45 % en moyenne**, sur le trajet 2 par rapport au trajet 1. Cette différence de prix s'explique par l'augmentation de la distance parcourue ainsi que de la vitesse, ce qui entraîne une augmentation des coûts variables, et sans surprise de la consommation de fuel.



On note la **nette augmentation des émissions de CO₂**, qui passent de 12,52 milliers de tonnes dans le premier scénario à 23,27 milliers de tonnes dans le second.

L'augmentation de la vitesse serait responsable d'environ les deux tiers de ces émissions additionnelles, toutes choses égales par ailleurs. Cependant, à vitesse constante, le trajet serait plus long de 21 jours.

Enfin, on remarque une **relation quasi-linéaire entre le prix du fuel et le coût du fret**.

Conclusion et perspectives

Trois questions émergent : l'étude de la marge plutôt spéculative de ces tensions, dû à la position oligopolistique des armateurs sur le marché ; l'effet sur le consommateur ; l'effet de seuil du coût du voyage à partir duquel l'armateur sera incité à adopter des mesures de décarbonation.

[Lien à la feuille de route nationale de décarbonation du maritime \(axes et leviers\) :](#)

REVISION DE LA STRATEGIE OMI ET ELABORATION DE MESURES DE MARCHÉ



CDMO – Centre de droit maritime et océanique



Encadrement : Morgane QUEREL



Du 01/06/2023 au 31/08/2023 (3 mois)



Financement : CARGO



Stagiaire : Romy GARNIER

Problématique et état de l'art

L'objectif du stage était de fournir une **analyse de deux réglementation-clés** pour la décarbonation du transport maritime, en discussion au sein de l'Organisation Maritime Internationale (OMI) :

- la **Stratégie Révisée** concernant la réduction des émissions de gaz à effet de serre provenant des navires de 2023,
- les **mesures fondées sur le marché (MBM)**.

Le premier texte consiste en une révision de la *Stratégie Initiale* de 2018. Les dernières discussions-clés ont eu lieu début juillet 2023, pendant le stage, et l'article qui analyse les voies d'amélioration du texte a été publié quelques jours avant la prise de décision à l'OMI. La seconde réglementation est toujours en cours de discussion au sein de l'OMI. C'est un sujet complexe incluant des considérations techniques, politiques et économiques.

Méthodologie

L'étudiante a analysé l'état des réglementations sur la décarbonation des navires. Elle a analysé la *Stratégie Initiale* de 2018 et les critiques venant d'Organisations non gouvernementales (ONG) ou gouvernementales. À partir de ces éléments, elle a proposé des voies à suivre pour la révision du texte.

En partant de cette analyse, de documents supplémentaires et de l'état des négociations sur les MBM, elle a déterminé les éléments à respecter et à inclure dans la réglementation pour garantir une décarbonation efficace et juste.

Résultats

Les résultats du stage se composent de **deux articles, disponibles sur le site web du Cluster CARGO** : www.cargo-cluster.fr [rubrique Actualités, publication les 20/07/23 et 3/10/23].

Le premier évoque les voies à suivre pour la révision de la *Stratégie Initiale de l'OMI* de 2018 :

- **Un renforcement des objectifs** pour les aligner sur les Accords de Paris de 2015.
- L'inclusion de tous les gaz à effet de serre sur une **approche « Well-to-Wake »**.
- L'adoption de principes pour **assurer une transition juste et équitable** dans l'adoption des mesures.

Le second évoque les éléments à inclure dans les MBM pour garantir une transition efficace, juste et équitable :

- **La légitimité politique de l'OMI** de les adopter.
- **L'évaluation de l'impact économique et environnemental de la MBM**, et d'utiliser les revenus pour les maîtriser.

Conclusion, perspectives






La *Stratégie Initiale* de 2018 a été révisée par l'OMI. Elle est plus ambitieuse et correspond mieux aux nécessités de décarbonation imposées par le changement climatique. Elle sera de nouveau révisée en 2028. Une analyse de ses effets réels et de ses voies d'amélioration possibles serait bénéfique pour guider les décideurs politiques.

Les MBM sont toujours en cours de négociation. La forme, les éléments à inclure et le calendrier d'adoption ont beaucoup évolué depuis le stage. Il en est de même pour les éléments techniques, économiques et politiques à prendre en compte. Une nouvelle analyse permettrait de dire si les négociations sont en bonne voie ou doivent être réajustées.

[Lien à la feuille de route nationale de décarbonation du maritime \(axes et leviers\) :](#)



LE FINANCEMENT DE LA DÉCARBONATION DU TRANSPORT MARITIME : ENJEUX JURIDIQUES

 CDMO – Centre de Droit Maritime et Océanique	 Encadrement : Caroline DEVAUX
 Du 08 avril au 08 juillet 2024 (durée : 3 mois)	 Financement : CARGO
 Stagiaire : Zoé SACRATO	

Problématique et état de l'art

Le transport maritime est l'un des secteurs les plus polluants, responsable de près de 3% des émissions mondiales de gaz à effet de serre. La décarbonation de ce secteur est donc essentielle pour atteindre les objectifs climatiques internationaux. Le stage vise à **recenser les principales mesures privées et publiques de financement permettant une décarbonation du transport maritime.**

Méthodologie

Une recherche documentaire a été accomplie, portant sur les rapports de l'OMI, les règlements européens, etc. Une étude du rôle des banques (BPI) et de leurs aides/prêts en faveur de la décarbonation du maritime a été réalisée. Une analyse des montages financiers de professionnels du secteur a été entreprise et une étude de cas a été réalisée sur **la stratégie financière de Néoline**, à l'aide d'un entretien avec Jean Zanuttini, son président.

Résultats



Combinés aux réglementations de l'OMI et directives européennes (système ETS), les outils juridiques du financement de la décarbonation du transport maritime commencent à prendre forme. On peut citer, entre autres :

- Le dispositif de suramortissement vert
- Les certificats d'économie d'énergie
- Les crédits-baux fiscaux
- L'ajout d'une garantie externe pour sécuriser les prêts bancaires
- Le programme Horizon Europe et le fonds européen Innovation
- Au niveau national : les programmes d'Investissements d'Avenir, les subventions de l'ADEME et le récent fonds de dotation de CMA CGM opéré par BpiFrance et doté de 200 millions d'euros.

Etude de cas Néoline : un article a été publié, qui présente la stratégie financière originale de Néoline, en détaillant en particulier le mécanisme de crédit-bail fiscal et la garantie externe assurée par BpiFrance, et analyse les principaux obstacles rencontrés.

>>> A consulter en ligne sur le site web du cluster CARGO : www.cargo-cluster.fr [actualité du 4/07/24]

Conclusion, perspectives

Malgré quelques avancées majeures, telles que le récent fonds de dotation mené par la BPI et CMA CGM, le cadre juridique lié au financement de la décarbonation du transport maritime reste dans l'ensemble encore vague et peu étoffé. Des modes intéressants de décarbonation tels que le vélique peinent à attirer les investisseurs, alors que cette méthode semble plus aisée à réaliser (gratuité de l'énergie, technologie maîtrisée).

Lien à la feuille de route nationale de décarbonation du maritime (axes et leviers) :



Cadre réglementaire



Prérequis

INTEGRATION DE LA PROPULSION VELIQUE DANS LES REGLEMENTATIONS



CDMO – Centre de droit maritime et océanique



Encadrement : Morgane QUEREL



Du 02/05/2024 au 31/08/2024 (durée : 4 mois)



Financement : CARGO



Stagiaire : Affaf BENDELLAA

Problématique et état de l'art

La propulsion par le vent est une solution prometteuse de décarbonation, qui pourrait équiper jusqu'à 10 000 navires d'ici 2030 et 40-45% de la flotte mondiale d'ici 2050. Malgré ses qualités environnementales, cette solution n'est pas toujours considérée à sa juste valeur par les réglementations, ce qui peut freiner son déploiement. Ce stage vise à **analyser la prise en compte de la propulsion par le vent dans les trois niveaux de réglementation** (international, européen et français).

Méthodologie

- Recherche documentaire pour cartographier et analyser les réglementations pertinentes,
- Entretiens avec des experts et des acteurs du secteur vélique,
- Échanges réguliers avec l'association Wind Ship, experte dans le domaine.

Sur cette base, une cartographie des réglementations a été produite (première étape du stage) et un argumentaire sera élaboré en faveur d'une meilleure prise en compte de la propulsion par le vent dans les réglementations, notamment au niveau international et européen.

Résultats de la 1^{ère} étape

Les réglementations actuelles ont tendance à considérer le vélique comme une solution d'amélioration de l'efficacité énergétique plutôt qu'une source d'énergie à part entière. Par ailleurs, l'Indicateur d'intensité carbone (CII) pénalise certains navires selon leur type ou leur taille, ce qui peut être défavorable à l'intégration de la propulsion vélique sur les navires. Enfin, le Règlement FuelEU Maritime prévoit une intégration de la solution de propulsion vélique grâce à un facteur de récompense, qui sous-estime largement ses bénéfices.

Réglementation	Échelle	Calcul	Points d'amélioration	Typologie des navires
EEDI – Indice nominal de rendement énergétique des navires neufs	Internationale (OMI)	Favorable	Considérer la propulsion vélique comme une source d'énergie	Jauge brute > 400
EEXI – Indice de rendement énergétique des navires existants	Internationale (OMI)	Favorable	Considérer la propulsion vélique comme une source d'énergie	Jauge brute > 400
CII – Indicateur d'intensité carbone	Internationale (OMI)	Indicateur basé sur les émissions réelles annuelles de CO2 Création d'inégalité entre les navires	Considérer la propulsion vélique comme une source d'énergie + Revoir les méthodes de calcul pour plus d'égalité entre les navires	Jauge brute > 5000
Règlement FuelEU Maritime	Européenne (UE)	Très défavorable car ne rend pas compte des bénéfices réels	Considérer la propulsion vélique comme une source d'énergie + Modification des calculs	Jauges brute > 5000

Conclusion, perspectives

Pour favoriser l'intégration de la propulsion vélique sur les navires, il est nécessaire d'**adapter les cadres réglementaires et refléter ses avantages réels en termes de réduction des émissions** et, pour ce faire, de disposer d'un argumentaire juridique solide pour justifier ces évolutions.

Prochaines étapes du stage :

- Perfectionnement et mise en forme de la cartographie des réglementations
- Développement de l'argumentaire juridique justifiant la prise en compte par les réglementations de **la propulsion vélique en tant que source d'énergie**.

Lien à la feuille de route nationale de décarbonation du maritime (axes et leviers) :








Cadre réglementaire



Propulsion par le vent et EnR

RESISTANCE A L'AVANCEMENT DE CARENES AVEC ANGLE DE DERIVE

	LHEEA – Hydrodynamique, Energétique et Environnement Atmosphérique		Encadrement : Jeroen WACKERS
	Du 15 mars au 7 avril 2024 (durée : 1 mois)		Financement : LHEEA
	Stagiaire : Gaétan ROUSSEAU		

Problématique et état de l'art

Ce stage concerne la **simulation numérique** de la résistance à l'avancement pour les cargos voiliers ou à assistance vélique. Les navires cargo classiques sont optimisés pour une résistance minimale en allant droit devant. Les cargos à voile par contre avancent toujours légèrement en crabe, pour créer une force latérale qui compense celle des voiles.

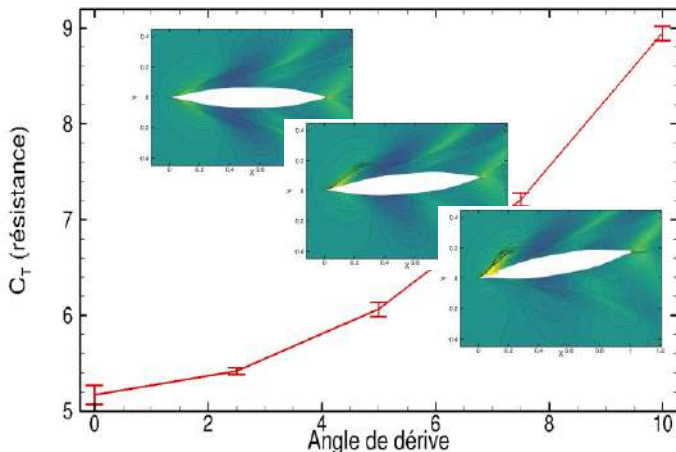
L'objectif du stage est d'**investiguer si cet angle de dérive a une influence sur la procédure de simulation numérique de la résistance à l'avancement** :

- (1) Le même type de maillage (découpage de l'espace) peut être utilisé, ou est-ce qu'il faut une précision plus élevée ?
- (2) Le lien entre le comportement d'un navire réel et d'un modèle en bassin change pour un angle de dérive non-zéro ?

Méthodologie

Des séries de simulations sont effectuées avec le **solveur fluide ISIS-CFD**, développé au LHEEA et intégré dans FINE/Marine de Cadence Design Systems. La capacité de raffinement adaptative du maillage, intégré dans ce solveur, est utilisée. Dans ces séries, des variations de précision du maillage et de l'échelle du navire (réel ou modèle), sont effectuées pour la même géométrie de carène (Series 60 Cb=0,6), avec et sans angle de dérive.

Résultats



Ci-dessus : résistance, incertitude estimée, et champs de vagues pour une carène en échelle modèle, en fonction de l'angle de dérive.

Grâce à l'adaptation de maillage, les simulations produites ont un haut niveau de fiabilité ; l'incertitude estimée ne monte pas de façon significative avec l'angle de dérive. En contrepartie, la taille des maillages augmente d'environ 3M cellules sans dérive à 5M pour 10° de dérive, afin de représenter correctement l'écoulement plus complexe.

Les calculs montrent que **l'échelle du navire a une influence importante** sur l'intensité des tourbillons derrière la carène, ce qui doit être pris en compte pour la conception du gouvernail et de l'hélice.

Conclusion, perspectives

Ce test initial indique que **les procédures de simulation de la résistance à l'avancement, basées sur le raffinement adaptatif du maillage, restent valables pour des bateaux avec des angles de dérive**. Des tests sur des carènes de géométries différentes seront cependant nécessaires pour confirmer cette hypothèse.

Lien à la feuille de route nationale de décarbonation du maritime (axes et leviers) :








Technos zéro émission



Propulsion par le vent et EnR

CARACTERISTIQUES AERODYNAMIQUES DES SYSTEMES VELIQUES

 Nantes, LHEEA/CSTB/LEMNA	 Encadrement : Caroline BRAUD (LHEEA), Marc DUFRESNE DE VIREL (CSTB), Inès GUGUEN-GICQUEL (LEMNA)
 Du 03/06/24 au 27/09/24	
 Stagiaire : Tristan SIMON	 Financement : CARGO

Problématique et état de l'art

Ce stage s'inscrit dans la continuité du projet Norvent, porté par l'association WindShip. Ce projet a permis un premier état de l'art de prédiction et de classification de performances pour les navires propulsés par le vent. Il ressort de ce travail des difficultés à établir de manière précise et fiable les performances des systèmes, et le besoin de se doter d'une méthodologie commune.

Objectifs

Ce stage se décline en deux volets :

- **Un volet expérimental** qui sera réalisé en soufflerie au CSTB pour **démontrer la fiabilité des essais réalisés à échelle réduite** au regard de données disponibles à échelle 1 et discuter des effets de similitude. D'autre part, il sera étudié **l'influence d'interactions voiles-voiles et voiles-structure** sur les performances d'un système vélique.
- **Une analyse concernant les essais de système de propulsion vélique**, pour caractériser et éclairer les choix de méthode d'évaluation des performances par type de technologie (rotors, ailes aspirées, voiles rigides, voiles souples, kites).

Livrables envisagés : Panorama des moyens disponibles, solutions adoptées et essais possibles, liste de critères et métrologie, fiche technique par type de propulseur vélique.

Méthodologie

- Revue de la littérature concernant les essais de système de propulsion vélique
- Entretiens complémentaires avec des chercheurs et représentants de la filière vélique.
- Étude au CSTB (souffleries atmosphériques) : possibilité de comparer les résultats à échelle 1 (travaux de C. Braud) pour discuter des effets de similitude avec **cn-aeromodels**, modèle numérique développé au LHEEA par A. Babarit et M. Charlou. Voici la méthode envisagée :
 - Étude d'un profil rigide à échelle réduite (à définir – 1/5^e, 1/10^e)
 - Efforts globaux (mesures par balance) et **étude de la fatigue**
 - Variation de la vitesse du vent (**effets du nombre de Reynolds**)
 - **Caractérisation du sillage** en aval du profil (mesures par fil chaud ou sonde Cobra)
 - **Effets d'interactions**
 - Interaction entre la structure du navire et la voile
 - Interaction entre deux voiles

Résultats

Une version actualisée de cette fiche sera publiée fin septembre 2024 à l'issue du stage pour présentation des principaux résultats.

[Lien à la feuille de route nationale de décarbonation du maritime \(axes et leviers\) :](#)





Technos zéro émission





Propulsion par le vent et EnR


IMPACT DU BIOFOULING SUR LES PERFORMANCES HYDRODYNAMIQUES DES NAVIRES


 GeM – Institut de Recherche en Génie Civil et Mécanique et ISOMER – Institut des Substances et Organismes de la Mer

 Du 16 avril au 7 juin 2024 (durée : < 2 mois)

 Stagiaire : Bonel TATI

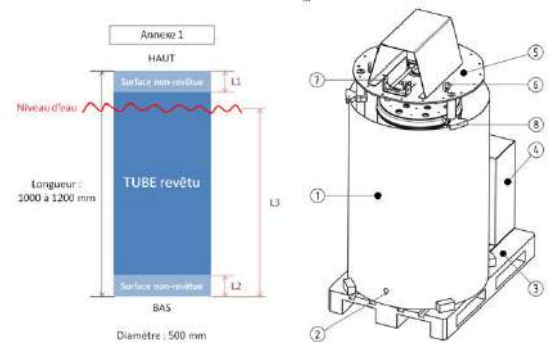
 Encadrement : Franck SCHOEFS (GeM)

 Co-encadrement : Pascal CASARI (GeM), Antoine DUBOIS (ISOMER)

 Financement : IUML

Problématique et état de l'art

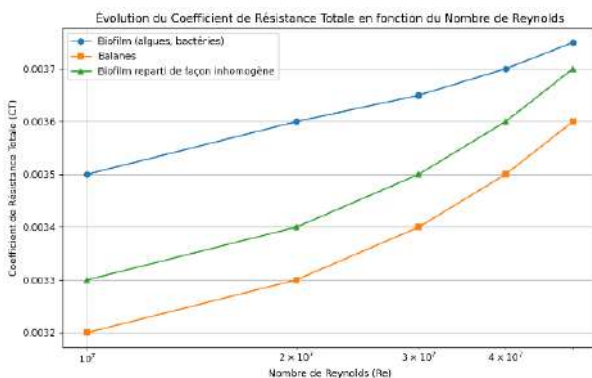
Le principal objectif de ce stage est de **fixer les conditions d'essais sur le banc de test Hydrotest du GeM** (ci-contre) pour l'analyse de l'impact du biofouling sur la résistance à l'avancement. Il s'agit de se rapprocher des conditions d'essais publiées en distinguant 3 facteurs impactant la résistance à l'avancement: l'hydrodynamique, le type de biofouling et le pourcentage de couverture.



Méthodologie

Pour atteindre les objectifs de cette étude, une approche méthodologique rigoureuse a été adoptée, comprenant une analyse bibliographique des essais physiques ou simulations numériques. C'est sur ces dernières que se sont portées nos analyses : elles utilisent des modèles de simulation CFD (Computational Fluid Dynamics) basés sur les équations de Navier-Stokes moyennées dans le temps (URANS). Ces simulations ont permis de modéliser l'effet de différentes conditions de biofouling sur la résistance des navires. Les auteurs de l'article [Franck, Arash et Hamed, 2022] considèrent le biofouling comme une forme de rugosité de surface, intégrée dans le modèle CFD sous forme de fonction rugosité de type Colebrook de Grigson (1992) : $\Delta U^+ = \frac{1}{K} \ln(1 + K^+)$ où K est la rugosité et K+ son effet sur l'écoulement turbulent.

Résultats (conditions d'essais à reproduire)



Trois études ont été analysées et comparées avec comme paramètre le nombre de Reynolds. Les courbes associées (ci-contre) montrent une augmentation de la traînée totale avec l'augmentation du nombre de Reynolds. Cela indique une relation directe entre la vitesse du navire (indirectement liée au nombre de Reynolds) et la traînée due à l'encrassement.

Les résultats indiquent également que différents types d'encrassement ont des impacts variés sur la traînée totale : l'article Akbar et al. se concentre sur le biofilm (bactéries, algue, champignons...) réparti de façon inhomogène ; Farkas, Degiuli et Martić sur le biofilm et Song et al. sur les balanes.

Conclusion, perspectives

Il est connu que le biofouling a un impact significatif sur les performances hydrodynamiques des navires. L'analyse réalisée permet de **visualiser la tendance non linéaire en fonction de l'avancement** et, sur la gamme observée, une **augmentation de la résistance à l'avancement de 8 à 13%**. Ceci confirme l'importance des stratégies de gestion du biofouling, telles que l'utilisation de revêtements antifouling et des techniques de nettoyage régulières. L'étude réalisée nous amène à nous **recentrer sur l'effet des balanes** dont nous changeons actuellement, en impression 3D, le niveau de rugosité et le pourcentage de couverture afin de créer un abaque beaucoup plus complet que les quelques études publiées.