

**NEOLINER 136 m, un navire cargo à propulsion vélique,
permettant une réduction majeure de consommation
d'énergie fossile et des émissions associées**

Vincent SEGUIN, Emeline ARNAUD

Mauric – Nantes (France)

Jean ZANUTTINI, Guilhem PEAN

Néoline – Nantes (France)

Maxime DUPUY

D-ICE Engineering –Nantes (France)

Olivier MOUSSELON

Mer Forte –La Forêt Fouesnant (France)

SOMMAIRE

Dans un contexte de marché globalisé et hautement compétitif, le transport maritime est de plus en plus confronté à la réalité de l'urgence climatique et des régulations qui en découlent. Le transport maritime doit en conséquence faire des efforts sans précédent d'adaptation de son fonctionnement. NEOLINER 136 m est un concept de navire Ro-Ro à voile offrant une solution innovante, durable et économiquement viable.

Le navire concept NEOLINER 136 m est doté d'un gréement duplex permettant de porter environ 4000 m² de voile qui assurent la propulsion du navire. Une propulsion conventionnelle est installée en complément pour des questions de sécurité, pour les périodes sans vent et les phases de manœuvre.

Cette publication présente le projet NEOLINER 136 m et la démarche scientifique qui a permis d'aboutir à la conception de ce navire innovant. Les technologies clés et les développements réalisés seront détaillés. Enfin, ce document présentera les développements qui peuvent être entrevus afin de concevoir la prochaine génération de navires de charge, avec un objectif d'atteindre un niveau « zéro-émission » en exploitation.

SUMMARY

In a highly competitive globalized trading market the maritime transport is more and more confronted with accelerating environmental and regulatory requirements and must therefore make unprecedented efforts to adapt its operating methods. NEOLINER 136 m is a concept of Sailing Ro-Ro Vessel specially designed to provide an innovative, sustainable and profitable solution.

The concept of NEOLINER 136 m is based on a vessel equipped with a set of 2 twin-masts (duplex type) carrying about 4000 m² of sails. It is also equipped with a conventional shaft line for safety, redundancy in case of no wind or during manoeuvring phases. This paper will present the scientific approach followed for the conception of this innovative boat and the technological advances developed.

In addition to the NEOLINER 136 m development status, the paper will present the further development to be foreseen, in order to design the next generation of cargo vessels intended to be Zero-Emission type, in operation.

1. INTRODUCTION

1.1. Le transport maritime aujourd'hui

Avec 10,7 milliards de tonnes transportées en 2018, le transport maritime est de très loin le premier moyen de transport de marchandises [1].

Ce secteur est donc vaste, et recouvre des réalités et des dynamiques très diverses en fonction des frets transportés. Cependant, le développement du transport maritime est directement lié à la croissance économique mondiale.

Porté à la fin du 20^{ème} siècle et dans les années 2000 par le décollage économique de nombreux pays, la crise de 2008 et l'effondrement durable des taux de fret qui l'a suivie ont profondément bouleversés le transport maritime.

Aujourd'hui, les effets de cette crise ont globalement été absorbés, au prix d'un resserrement considérable du monde des armateurs. L'exemple le plus emblématique est le secteur du conteneur, où trois alliances se partagent 80% du marché aujourd'hui, contre une quinzaine d'acteurs 10 ans auparavant.

Dans un tel contexte, la recherche de rentabilité des principaux armateurs passe par la mise en œuvre de navires de plus en plus grands, et la rationalisation du nombre de services et donc de ports touchés.

Le transport maritime est donc aujourd'hui articulé autour de services de lignes peu nombreux et très massifiés, desservant uniquement les hubs logistiques les plus importants. Les gigantesques flux de frets générés par ces hubs sont pris en charge au mieux par des navires plus petits (les « feeders »), mais le plus souvent par des norias de camions qui vont par la route vers le site receveur.

Le transport maritime est très dépendant par ailleurs des coûts des combustibles, car ce poste représente environ 50% des coûts opérationnels d'un navire[2]. Exposés aux risques des fluctuations des prix du baril alors que les taux de fret sont au plus bas, les armateurs ont mis en place des systèmes pour répercuter ces variations vers le client final, le « BAF » (Bunker Adjustment Factor).

Du point de vue des clients chargeurs, ces coûts sont imprévisibles, mais ils étaient admis dans les années 2010 car accompagnés d'une baisse forte des taux de fret. Cependant les taux de fret remontent globalement depuis fin 2018, laissant craindre aux chargeurs un double impact « taux de fret fort / BAF forte » dans les prochains mois. Par ailleurs, la limite de taille des navires semble globalement atteinte (notamment pour des raisons structurelles et d'infrastructures portuaires).

1.2. La nécessité de réduire l'impact écologique du transport maritime

Absorbant 7 % de la demande mondiale de pétrole, le transport maritime ne produit que 3 % des émissions mondiales de gaz à effets de serre (GES) [3]. Les scénarios futurs annoncent une augmentation de 50 % à 250 % des émissions de GES d'ici à 2050 si aucun changement de paradigme n'est effectué [4]. Le transport maritime reste toutefois le mode de transport le plus sobre actuellement par unité transportée.

Ce fait incontestable coexiste cependant avec une diversité d'impacts beaucoup plus larges.

En effet, les carburants utilisés, majoritairement du fioul lourd, sont les restes de raffinage, et concentrent toutes les molécules indésirables retirées des fiouls plus raffinés. Ainsi, le transport maritime serait à l'origine de 12 % des émissions mondiales de soufre, de 13 % des émissions d'azote, et d'une part importante des émissions de particules fines et ultrafines[5].

A cela il convient d'ajouter la pollution sonore sous-marine liée à la cavitation des hélices, les risques de pollution biologique liés aux eaux de ballasts, et l'impact environnemental global lié aux énormes infrastructures portuaires nécessaires pour accueillir les très grands navires.

Enfin, il faut rappeler l'impact des pollutions maritimes accidentelles, qui bien que plus rares grâce à une prise de conscience du monde maritime, n'ont pas disparu.

Absent lors des négociations de la COP 21, le transport maritime commence malgré tout à prendre en compte cette réalité.

Depuis les années 2000, l'Organisation Maritime Internationale (OMI) a ainsi progressivement mis en place des réglementations qui limitent les risques de pollution maritime (accidentelles ou non) via la réglementation MARPOL, imposent de mesurer les consommations d'énergie (indicateurs EEDI, Energy Efficiency Design Index et EEOI, Energy Efficiency Operational Indicator) [6], ou encore de stériliser les eaux de ballast.

En parallèle, l'OMI et certains états ont mis en place des zones de contrôle des émissions de soufre à 0,1 % (zones SECA), qui seront prolongées par une limitation à 0,5 % de taux de soufre pour l'ensemble du globe dès le 1er janvier 2020 (contre 3,5 % actuellement).[7]

Cette dernière mesure va avoir un impact majeur sur le monde maritime, et pourrait conduire à une augmentation de 60 à 100 % du prix des combustibles marins, à prix du pétrole égal.

Enfin, sur le plan des émissions de GES, l'OMI a fixé en 2018 l'objectif d'une réduction de 50 % des émissions d'ici à 2050 comparées à celles de 2008.

Dans un tel contexte, le transport maritime est soumis à une double-contrainte, à la fois énergétique et « low-cost ».

1.3. Un marché en attente de solutions

Lorsque sont mises bout-à-bout l'ensemble des tendances actuelles et des contraintes fortes qui y sont associées, des opportunités nouvelles apparaissent.

Au contexte réglementaire exposé précédemment, qui s'accompagne par ailleurs d'une pression sociétale nouvelle, répond une véritable attente du marché pour des solutions durables et robustes. En effet, les entreprises s'intéressent de plus en plus aux impacts que leur activité génère, et sont donc attentives aux solutions qui leur permettraient de les réduire. Par ailleurs, les chargeurs s'inquiètent de l'impact non-maîtrisé des réglementations sur les coûts de transport, qui pourraient augmenter.

Comme cela a été vu, la massification des frets, si elle a été porteuse d'une baisse des coûts, a également rallongé les chaînes logistiques, laissant apparaître des zones moins

bien desservies, et des besoins de transports plus spécialisés.

De plus, la vulnérabilité des coûts de transport vis-à-vis du prix du pétrole génère une forte attente vis-à-vis d'une offre de transport qui comporterait une véritable indépendance énergétique.

1.4. NEOLINE, le pari d'un cargo à voile

Ce contexte est donc favorable à l'émergence d'une nouvelle offre de transport de fret, à la condition que celle-ci apporte une véritable valeur ajoutée en termes d'indépendance énergétique et de maîtrise des impacts environnementaux. D'autre-part, une telle offre intelligemment positionnée sur des lignes secondaires et/ou des frets spécialisés, peut également créer de la valeur logistique, car celle-ci ne serait pas en concurrence directe avec les grandes lignes massifiées.

NEOLINE a pris le pari de proposer une offre de transport de fret à voile. Le choix de la zone Atlantique Nord et de la ligne commerciale Saint-Nazaire / Baltimore s'est rapidement imposé pour ce premier cargo à voile. En effet, il s'agit d'une région suffisamment ventée pour y faire naviguer un cargo à voile. De plus, la ligne Saint-Nazaire / Baltimore s'avère actuellement mal desservie et fait face à des taux de fret importants malgré un besoin réel des chargeurs sur cet axe.

A l'origine du projet NEOLINE se trouve l'engagement d'un groupe d'officiers de la Marine Marchande, fédérés par Michel Péry, Commandant de navires rouliers, et tous convaincus que les enjeux climatiques allaient conduire le monde du shipping à envisager de nouveaux modes de propulsion pour améliorer leurs performances environnementales.

Dès le départ, l'énergie éolienne en tant que mode de propulsion principale a été retenue car suffisamment puissante et immédiatement disponible pour propulser des navires de charge.

Sous forme associative depuis 2011, puis en société depuis 2015, l'équipe NEOLINE s'est concentrée initialement sur l'établissement d'une proposition technique crédible. NEOLINE a poursuivi les développements technologiques avec plusieurs partenaires techniques, tout en approchant le marché pour trouver son positionnement commercial et en

nourrir les travaux techniques, ce qui a permis d'aboutir à la conception d'un premier cargo à voile Néoliner 136 m. Ses partenaires techniques principaux sont MAURIC pour la conception générale du navire et l'optimisation hydrodynamique, MER FORTE pour la conception générale du gréement et D-ICE pour les études de routage.

2. NEOLINER 136 M, PREMIER CARGO A VOILE

2.1. Une conception collaborative

La conception de Néoliner 136 m peut être décrites en trois étapes majeures détaillées ci-après.

❖ Validation de la zone de navigation

Dans un premier temps, une étude de la zone de navigation a été réalisée.

Afin de valider le potentiel vélique et l'intérêt commercial de la zone de navigation, une première étude de routage a été effectuée. Le but du routage est de minimiser un ou plusieurs objectifs (temps de trajet, consommation, etc.), tout en respectant des contraintes prédéfinies (conditions environnementales maximales, zones géographiques à éviter, mouvements du navire, heure d'arrivée, etc.). Pour ce faire, il est nécessaire de connaître la vitesse du navire en fonction de la direction et de la force du vent et les conditions météorologiques du site, informations synthétisées dans une polaire de vitesse (table indiquant la vitesse du navire selon l'angle et la force du vent).

Le premier routage a été effectué avec une polaire à vitesse constante de 11 nds dans le sens St Nazaire-Baltimore et 13,5 nds au retour sauf pour les zones à ± 50 degrés du vent où la vitesse a été considérée nulle. Dans cette configuration la force du vent n'a pas d'influence ; seule sa direction a un impact sur la vitesse.

Ce premier routage a permis de s'assurer qu'il était physiquement possible de réaliser la route Saint-Nazaire / Baltimore à la voile et a permis de définir la zone dans laquelle le navire serait amené à évoluer en évitant d'être face au vent.

Dans un second temps, une polaire estimée du futur navire a été définie. Cette polaire fictive mais réaliste a été choisie de manière à ce que

les performances du navire permettent d'assurer des temps de traversées acceptables dans la cadre d'une activité économique. A partir de cette polaire estimée, une seconde étude de routage a été réalisée, permettant d'obtenir des premières estimations des temps de traversée et de répertorier les conditions météorologiques dans lesquelles le cargo sera statistiquement le plus fréquemment amené à naviguer. Celles-ci sont appelées points de fonctionnement du navire.

❖ Conception du navire

La conception du navire a ainsi été orientée par la polaire estimée à l'étape précédente : il s'agissait de concevoir un navire atteignant au moins les performances estimées. Le navire Néoliner 136 m a été conçu dans une optique de propulsion principale à la voile. Les efforts de conception et réflexions se sont donc concentrés sur les performances hydrodynamiques et aérodynamiques,

La forme de carène, les appendices et le gréement ont été dimensionnés et optimisés en fonction des points de fonctionnement définis à l'issue de l'étape 1. Des calculs CFD (Computational Fluid Dynamics) et des calculs éléments finis ont été réalisés, permettant d'établir le VPP (Velocity Prediction Program) du navire. La polaire issue de ce VPP a été utilisée pour une nouvelle étude de routage. Celle-ci a permis d'évaluer les performances à la voile du Néoliner et de confirmer les choix de conception.

A cette étape plusieurs itérations ont été nécessaires afin de proposer un navire optimisé et répondant également aux besoins du marché (port en lourd, surfaces de garage). Cette démarche itérative peut être synthétisée par le schéma de la Figure 1, les études de routage servant d'aide au dimensionnement mais aussi d'outil de validation.

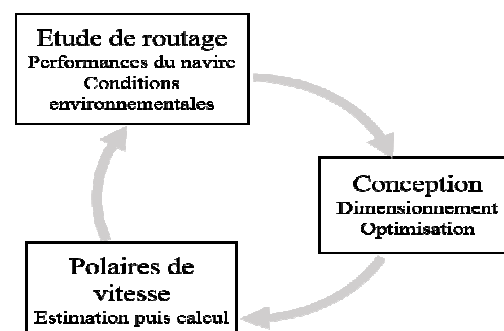


Figure 1 : Démarche scientifique adoptée lors de la conception du navire Néoliner 136 m

❖ Vers une propulsion hybride voile + moteur

Enfin, tant pour des raisons de sécurité que pour assurer des temps de traversée admissibles quelles que soit les conditions météorologiques, il a été choisi de doter le navire Néoliner 136 m d'une propulsion mécanique pour suppléer la propulsion vélique en tant que de besoin. La dernière phase de conception a donc consisté en l'analyse de cette propulsion (mode de fonctionnement voile + moteur) et en l'estimation de la consommation de Néoliner 136 m dans ce fonctionnement hybride.

Une polaire prenant en compte les deux modes de propulsion a été établie à partir du VPP du navire, de ses performances en antidérive et des caractéristiques de la propulsion mécanique envisagée. Une dernière étude de routage a donc été effectuée basée sur cette polaire voile / moteur, en fixant un objectif de temps de traversée à 292 h (correspondant à une traversée orthodromique à 11 nds).

Cette dernière étape a permis de valider le concept du Néoliner 136 m et sa viabilité commerciale en démontrant que les temps de traversées étaient compatibles avec les exigences commerciales d'une telle ligne (12 rotations par an) et que les vitesses cibles étaient atteignables la majeure partie du temps à la voile seule, ou ponctuellement avec un fonctionnement hybride voile + moteur.

Pour mener à bien ce bouclage, chaque société à contribuer à faire converger le concept vers une solution viable : MAURIC optimisant et quantifiant les performances hydrodynamiques et l'organisation du navire ; MER FORTE en

quantifiant les efforts aérodynamiques et calculant les polaires de vitesse sous voile ; D-ICE par ses études de routage statistique basées sur des données météorologiques historiques sur cette ligne ; NEOLINE se chargeant de son côté de compiler les résultats et d'établir les scénarios de navigation.

In fine les modèles de routage effectués lors de cette étude ont montré que l'utilisation de la propulsion mécanique seule est limitée aux périodes de manœuvres ou chenalages ou en de très rares conditions météorologiques particulièrement défavorables.

La démarche de conception ayant pour objectif d'aboutir à un navire cargo à voile permettant de traverser l'Atlantique de Saint-Nazaire à Baltimore en un temps limité a ainsi pu être mise en évidence.

2.2. Etude de la zone de navigation

Les conditions environnementales de la zone Atlantique-Nord ont été étudiées en détails par D-ICE afin de valider la viabilité du projet. A partir de données météorologiques, des études de routage ont été effectuées et les conditions météorologiques que Néoliner 136 m aurait rencontrées ont été relevées.

Les données d'entrées utilisées pour cette étude sont issues de deux modèles météo présentés dans le Tableau 1.

Cinq ans de données météo (de 2013 à 2018) ont été utilisées afin que les conditions observées soient représentatives de ce que verra le Néoliner 136 m et que les conclusions tirées de ces données soient objectives.

Tableau 1: Caractéristiques des modèles météo dont les données ont été utilisées pour l'analyse de la zone de navigation Atlantique Nord

Modèle	Organisme	Résolution du modèle	Variables
ERA Interim	ECMWF	1/2 ° - 6h	Vent Vagues Température de l'air
PSY4V3R1	Mercator Ocean	1/12 ° - 6h	Température de l'eau

Tel qu'exposé précédemment, aux différents stades de développement du navire, des études de routage avec des polaires de vitesse (au départ estimées, puis calculées) correspondant à différents niveaux d'avancement dans la

conception du navire ont été réalisées. Les résultats présentés ici sont issus des routages basés sur la polaire à la voile uniquement.

La solution se base sur la théorie des graphes [8], approche différente de celles traditionnellement utilisées dans le routage maritime et permettant, moyennant un maillage initial de l'océan, d'effectuer du mono et multi-objectif de manière flexible et performante.

Plus de 600 trajets ont été calculés pour chaque étude permettant de fournir des statistiques fiables sur les conditions environnementales de la zone (vitesse et angle de vent réel et apparent, hauteur significative, direction relative et période des vagues, température de l'eau et de l'air) et sur les performances du navire (temps de trajet et vitesse du navire)

Une synthèse des conditions de vent et de mer est présentée au Tableau 2. Ce tableau fournit un ordre d'idée des conditions qu'aurait vu le navire Néoliner 136 m de 2013 à 2018. Il aurait ainsi rencontré entre 0 et 44 nds de vent (avec une moyenne de 18,9 nds sur le trajet Saint-Nazaire/ Baltimore), et des hauteurs de vagues entre 0 et 12 m (et une moyenne de 2,9 m). Cette méthode est conservative car le routage n'avait pas de condition d'évitement de valeurs environnementales maximales. Il est probable que dans la réalité les conditions vues par le navire soient légèrement moins sévères, s'il bénéficie d'un système de prévision météo et routage embarqué efficace.

Tableau 2: Valeurs moyennes, minimum et maximum de vent et de vagues observés sur l'ensemble des routages météorologiques réalisés à partir des données de 2013 à 2018

	Saint-Nazaire /Baltimore			Baltimore / Saint-Nazaire		
	Moyenne	Min	Max	Moyenne	Min	Max
Vitesse vent (nds)	18,9	1,3	43,4	20	0,5	44
Hauteur vagues (m)	2,9	0,2	12,2	2,9	0	10,5
Période vagues (s)	8,3	3,6	16	8,2	2,2	15,6

Les températures de l'air et de l'eau ont aussi été étudiées afin d'effectuer un bilan énergétique global du navire. Les moyennes respectives obtenues sont de 13,3°C pour l'air et 13,8 °C pour l'eau.

Toutefois, afin d'effectuer un dimensionnement précis du navire, les données ont été étudiées plus en détails, grâce à l'outil PowerBI (logiciel développé par Microsoft permettant l'analyse et la visualisation de données), permettant d'effectuer facilement

des analyses croisées et des filtrages dynamiques selon les saisons, selon les conditions environnementales, ...

Les résultats obtenus en propulsion vélique uniquement et visualisés sur PowerBI pour les occurrences d'angle relatif des vagues / hauteur des vagues sont présentés à la Figure 2. Ainsi sur le trajet Saint-Nazaire / Baltimore, le navire rencontrera principalement des vagues de travers avant et de l'arrière, et sur le retour principalement de l'arrière.

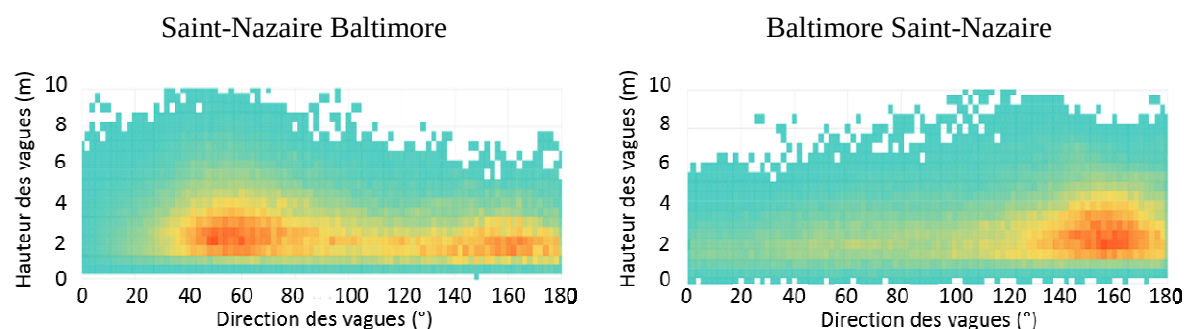


Figure 2 : Table d'occurrence d'angle relatif des vagues/ hauteur des vagues sur les trajets Saint-Nazaire/Baltimore et Baltimore / Saint-Nazaire en bas, obtenus avec le routage voile seule

Les mêmes graphiques sont disponibles à la Figure 3 concernant le vent vrai et le vent apparent. A l'aller, les plus fortes occurrences sont obtenues entre 40° et 80° pour le vent vrai et des angles de vent apparent serré (entre 30° et 50° du vent) En revanche sur le retour, les angles de vent réel sont plus dispersés avec deux zones principales de 70° à 110° et de 150°

à 180°, en conséquence les occurrences les plus fortes en vent apparent forment aussi deux groupes de 30° à 60° et de 130° à 180°.

En conclusion sur la route transatlantique de Saint-Nazaire à Baltimore le Néoliner devra être capable de naviguer à différentes allures du près, jusqu'au vent arrière.

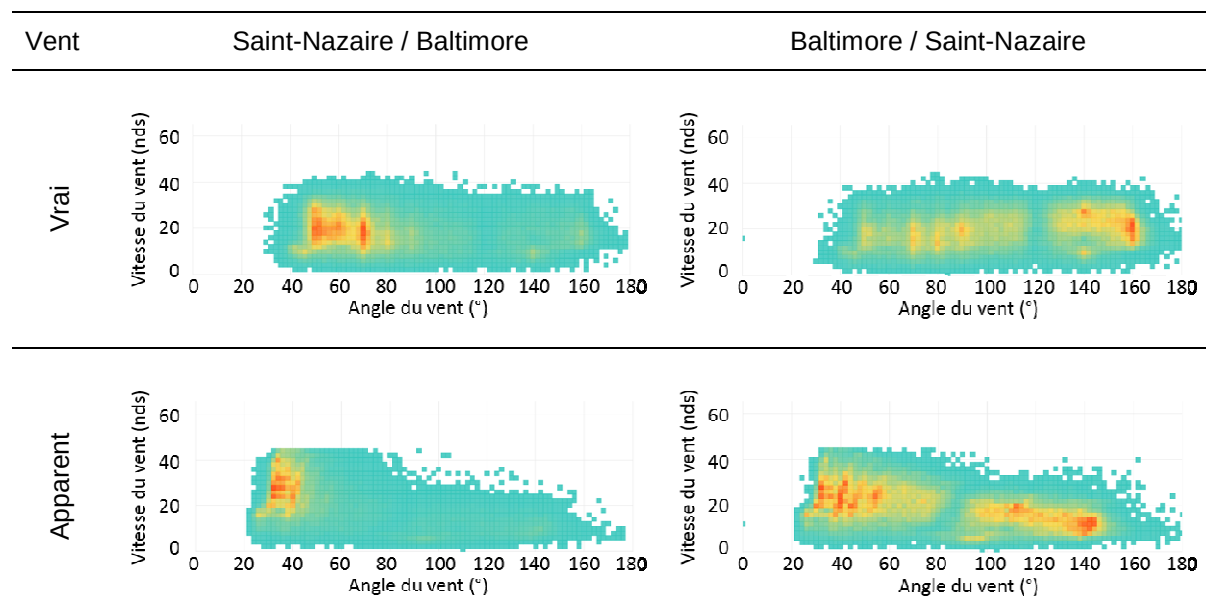


Figure 3 : Tables d'occurrences angle / vitesse de vent obtenues avec la polaire de vitesse de propulsion voile

Cette étude permet, en outre, de définir les points de fonctionnement du navire, qui sont les conditions dans lesquelles le navire sera le plus régulièrement amené à naviguer. Ces points de fonctionnement sont issus de graphiques tels que ceux présentés aux Figure 2 et Figure 3. Ils ont notamment servi à la conception et au dimensionnement du gréement.

2.3. Propulsion principale à la voile

L'étude de la zone météorologique fournit des informations précieuses concernant les futures conditions d'exploitation du navire.

Elle permet de définir des orientations en termes d'architecture de gréement, surface de voilure, etc. mais elle ne constitue pas en soit une information suffisante pour concevoir le navire.

Il a été nécessaire de combiner ces informations avec les objectifs opérationnels du navire (programme de navigation, capacité de transport, etc.), les contraintes réglementaires et une réelle maîtrise des coûts (construction et exploitation).

De multiples itérations ont permis de prendre en compte tous ces éléments pour aboutir à un premier navire le Néoliner 136 m présenté à la Figure 4 et dont les caractéristiques principales sont fournies par le Tableau 3.

Ce navire répond à la fois au besoin de propulsion à la voile, grâce à sa surface de voilure, à la marche hybride voile + moteur grâce à sa propulsion mécanique, mais également aux exigences opérationnelles (port en lourd, surface de chargement, zones équipage, passagers, etc.) et réglementaires (sécurité, stabilité, redondance des moyens de production d'énergie, manœuvrabilité, etc.)



Figure 4 : Néoliner 136 m

Tableau 3 : Caractéristiques principales du navire cargo Néoliner 136 m

Longueur	136 m
Largeur	24,2 m
Tirant d'eau	13 m réductible à 5,5 m
Tirant d'air	65 m réductible à 41,5 m
Vitesse commerciale	11 nds
Vitesse maximale	14 nds (propulsion mécanique) Environ 16 nœuds (voile)

Le navire a été conçu pour pouvoir être opéré par 15 membres d'équipages et permet d'accueillir 12 passagers.

La volonté d'aboutir à un navire ayant comme propulsion principale à la voile a demandé un travail approfondi sur le gréement, élément essentiel de la propulsion à voile mais aussi sur l'hydrodynamique du bateau. Ces deux développements sont présentés ci-après :

2.3.1. Une carène optimisée et des appendices spécifiques développés pour remonter au vent.

Si la mise en place de voiles sur des navires de commerce a déjà été ou est actuellement envisagée sur différents types de navire, celle-ci est souvent considérée comme un simple moyen de propulsion additionnelle. Dans le cas du navire Néoliner 136 m, il s'agit bien du mode de propulsion principal, et la carène et ses appendices doivent en tenir compte. La carène de Néoliner 136 m et ses appendices ont ainsi été optimisés dans le but de concevoir une carène de cargo qui soit efficace dans une gamme de vitesses de 11 à 16 nœuds et en tenant compte de l'influence de l'angle de gite et angle de lacet. Ce dernier paramètre, habituellement négligé sur les navires à propulsion mécanique est ici fondamental car

constitue le paramètre essentiel d'une carène de voilier, pour peu que celui-ci doive remonter au vent

Les calculs menés par MAURIC ont permis de conforter NEOLINE dans son intuition : la carène du Néoliner 136 m ne peut à elle seule fournir une capacité antidérive suffisante pour permettre au navire de remonter au vent efficacement et il est nécessaire de lui adjoindre des appendices supplémentaires.

Le phénomène est connu ; tous les voiliers performants sont équipés de dérives ou quilles. Pourtant la plupart des navires de commerce à voile n'en étaient jusqu'à présent pas équipés, les rendant inaptes à naviguer dans certaines conditions de vent ou les obligeant à tirer des bords avec des angles très importants par rapport au vent, allongeant très fortement leur temps de navigation.

Les calculs menés par MAURIC sur le Néoliner 136m ont montré la nécessité de disposer d'un ou deux plans antidérive (la configuration avec deux plans antidérive est présentée à la Figure 5). Si le choix du profil et la section de telle dérive ne constituent pas un challenge en soi car des études existent sur ce sujet ([9],[10], [11]), la complexité réside dans la recherche d'une solution permettant la mise en œuvre d'appendices rétractables du plus de 9 m d'envergure, afin de rendre le tirant d'eau compatible avec les profondeurs d'eau acceptables dans les ports envisagés.



Figure 5 : Néoliner 136 m en configuration 2 plans antidérive

De même la recherche de configurations optimales a conduit à évaluer différentes configurations d'appendices en mixant les possibilités d'un à trois safran(s), une à quatre dérive(s), un plan mince, etc. Ces configurations ont été comparées à la fois d'un point de vue efficacité hydrodynamique mais aussi vis-à-vis de leur cout, de leur impact sur les zones de chargement, pour en retenir la solution finale : une configuration avec safran unique type safran à flap (permettant de générer une forte portance) associée à deux

dérives basculantes latérales et un plan mince axial constituent pour le Néoliner 136 m la configuration optimale d'un point de vue antidérive, tout en permettant de dégager l'ensemble du pont garage inférieur pour les opérations commerciales.

2.3.2. Le gréement double duplex

La conception du gréement a demandé une forte réflexion de par son importance au sein du projet. De fortes attentes mais aussi de fortes contraintes reposaient sur sa définition. En effet, il s'agissait de concevoir un gréement suffisamment performant pour assurer la propulsion d'un navire chargé de 136 m mais aussi suffisamment robuste pour que l'équipage puisse naviguer à la voile en sécurité par tout type de météo.

Enfin l'intégration de ce gréement doit lui aussi s'intégrer dans une problématique d'exploitation et notamment de plan de chargement, en impactant le moins possible le pont garage, voire en ne constituant pas un obstacle et une contrainte pour le chargement du fret ; c'est en particulier cette contrainte qui a conduit NEOLINE à imaginer la mise en place d'un gréement Duplex, qui se base sur un

portique portant deux grands-voiles et deux focs sur enrouleurs (un par bord).

L'autre avantage du gréement Duplex est de pouvoir multiplier les configurations de voilure en fonction du vent, chaque portique portant 4 voiles, tout en maintenant des hauteurs de centre vélique et de centre de gravité du gréement relativement limitées.

Lors du lancement du projet, trois géométries de gréement ont été testées en CFD par MER FORTE afin de déterminer la géométrie la plus efficace :

- Géométrie 1 : Double duplex (2x2 mats répartis longitudinalement le long du navire) conduisant à une surface de voile de 3730 m² réparties en 8 voiles (4 grands voiles et 4 focs)
- Géométrie 2 : Semi-duplex (duplex + 2 mats à l'axe du navire) permettant de gréer jusqu'à 3000 m² de voile
- Géométrie 3 Triple duplex (3 x 2 mats répartis longitudinalement le long du navire) portant jusqu'à 4100 m² de voile.

Le Tableau 4 fournit les résultats force propulsive et force de dérive induites pour différentes forces de vent et angle de vent.

Tableau 4 : Synthèse des études CFD réalisées sur trois types de gréements pour différentes vitesse et direction du vent

Angle de vent apparent	35°						80°		
Vitesse de vent apparent	20 nds			45 nds			20 nds		
Géométrie de gréement	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Surface de voile S (m ²)	3730	3000	4100	3730	3000	4100	3730	3000	4620
Force propulsive F _x (kN)	71,9	69,2	87,3	364,6	351,3	350,3	185,5	175,2	254,4
Force de dérive F _y (kN)	-189	-187	-267	-961	-951	-1072	-77	-77	-123
Performance F _x /F _y (-)	0,379	0,369	0,326	0,380	0,370	0,327	2,403	2,282	2,075

Un critère de performance calculé en divisant la force propulsive par la force de dérive a été adopté. Comme cela a été évoqué précédemment la propulsion à la voile induit nécessairement une dérive qui n'est pas présente avec une propulsion classique. L'objectif ici est de choisir un gréement qui permettra de limiter la dérive tout en permettant une avance satisfaisante. La géométrie de gréement 1 est celle qui présente

les meilleurs résultats pour les trois configurations de gréement considérées.

Il a donc été choisi d'équiper le Néoliner 136 m d'un gréement double duplex, présenté à la Figure 6. Le fractionnement du plan de voilure obtenu avec ce gréement (4 grand-voiles et 4 focs) permet d'adapter les réglages et les configurations en fonction des conditions de vent rencontrées.

Ces études ont évidemment été menées avec les études de configurations d'appendice, avec l'objectif de dimensionner ces derniers au juste besoin des efforts de dérive induits par la propulsion vélique.

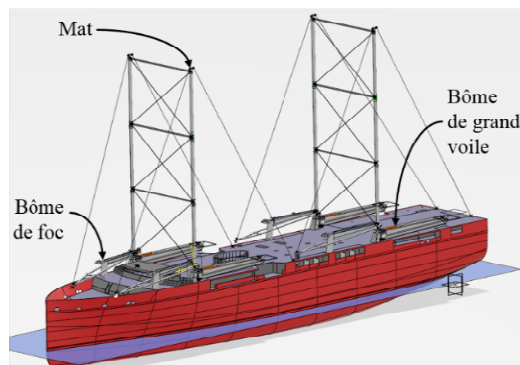


Figure 6 : Gréement double duplex conçu pour Néoliner 136 m

Une fois le type de gréement sélectionné, ce dernier a été dimensionné. De par sa complexité et les multiples configurations de voilures qui peuvent être mise en œuvre, différents cas de chargement ont été considérés, selon le nombre de mats grésés. Pour chaque cas, la force du vent qui amène le bateau à un angle de gîte fixé à 5° est déterminée. Le dimensionnement par un logiciel éléments finis de l'ensemble des éléments du gréement a ainsi été effectué.

L'angle de gîte fixé à 5° constitue une hypothèse de calcul permettant d'effectuer un dimensionnement sécuritaire du gréement, les calculs de stabilité du navire démontrant que la gîte sous voile ne dépasserait pas 2° en exploitation normale.

Enfin les études de routage et analyses de configurations de voilure ont conduit à dimensionner un gréement d'une hauteur de 50 m environ qui, ajoutée à la hauteur du pont supérieure conduit à un tirant d'air sous voile de plus de 65m. En conséquence la mature du Néoliner 136 m a nécessité le développement d'une solution de mâture rabattable lui permettant de passer sous les ponts. Les deux gréements Duplex sont ainsi rabattables vers l'arrière du navire afin de diminuer le tirant d'air du navire de 65 m à 41,5 m.

De même, le navire Néoliner en tant que navire commercial se doit de respecter des temps de traversées et ce quelles que soit les conditions météorologiques. Pour cette raison, il a fallu concevoir une architecture de propulsion

mécanique à la fois performante en manœuvre, pouvant servir d'appoint de puissance en complément de la voile, mais également créant le moins de traînée possible lorsque le navire est sous voile, afin de ne pas constituer de frein à l'avancement.

2.3.3. Une architecture de puissance adaptée à la marche hybride voile + moteur

Le Néoliner 136 m bénéficie également d'une propulsion mécanique, en plus des voiles, spécialement développée pour :

- D'une part assurer la sécurité du navire lors des manœuvres portuaires ou relayer la voile lorsque les conditions de vent sont particulièrement défavorables (vent nul ou vents très forts dépassant les charges autorisées dans les voiles).
- Fournir un appoint de puissance dans les vents faibles, et lorsqu'il est nécessaire de maintenir une vitesse moyenne suffisante pour assurer les durées de traversées commerciales.

La propulsion mécanique, indispensable d'un point de vue réglementaire permet de fiabiliser la durée de traversée en toute saison et ainsi d'assurer la régularité de la ligne commerciale.

Dans la perspective d'un navire à faibles émissions, l'accent a bien sûr été mis sur une architecture de production de puissance bénéficiant du meilleur rendement possible.

Mais le Néoliner étant avant tout conçu dans l'objectif d'utiliser principalement la propulsion vélique, la propulsion mécanique ne doit pas constituer une charge financière trop importante (coûts d'acquisition et maintenance) ni induire une traînée additionnelle sous voile trop pénalisante.

La conception de l'architecture de puissance et de la propulsion a donc été orientée vers les objectifs de minimiser la traînée sous voile, limiter les coûts d'acquisition et maintenance, tout en bénéficiant d'un bon rendement énergétique.

Plusieurs variantes ont été étudiées et comparées : propulsion mono ou bi-lignes d'arbres, architecture diesel-direct ou diesel électrique, propulsion hybride avec alternateur attelé et batteries, etc.

De même des solutions avec moteurs et/ou générateurs semi-rapides ou rapides ont été

comparées en termes de bilan énergétique, cout, impact sur la traînée, maintenance, etc. Le choix a également été effectué en tenant compte du nombre d'heures de fonctionnement potentiel de ces équipements, afin de trouver le meilleur compromis technico-économique.

In fine la solution retenue est basée sur l'architecture suivante :

- Une propulsion diesel mono-lignes d'arbres avec moteur diesel semi-rapide de 3.2 MW ; le mono-lignes d'arbres permet ici de réduire les coûts d'acquisition mais, surtout, la traînée induite sous voile.
- Cette propulsion est munie d'une hélice à pas variable, avec mode « full-feathering » permettant le réglage du pas à tous les points de fonctionnement possibles du navire (avec ou sans voile) et permettant de limiter la traînée sous voile
- Deux groupes électrogènes de 0.6 MW environ pour l'alimentation du bord.
- Un alternateur attelé à vitesse variable pouvant fonctionner en moteur électrique de propulsion de 0.9 MW, utilisable éventuellement en booster en appoint du moteur diesel principal.
- Un parc de batteries de propulsion de 1000 kWh environ qui permettra de lisser les pics de puissance (« peak shaving ») et autoriser un fonctionnement zéro-émission sous voile, pendant plusieurs heures d'affilée.

Ce choix a été motivé par la souplesse apportée par l'alternateur attelé qui permet d'alimenter le bord lorsque le moteur diesel est en route, et monter ainsi le niveau de charge du moteur sans avoir à démarrer un groupe électrogène (fonctionnement à un régime aussi proche que possible de la consommation spécifique optimale du moteur). La puissance disponible sur l'alternateur permet également la recharge des batteries de propulsion lorsque le moteur principal est en route.

Sous voiles, il peut fonctionner en moteur électrique et fournir les apports de puissance nécessaires dans le petit temps, en étant alimenté par les batteries ou un des groupes électrogènes.

D'après les simulations réalisées dans le cadre de ce projet, le rendement de cette architecture s'est révélé 7 à 10% plus économe en énergie qu'une architecture diesel électrique. Elle est

également beaucoup moins coûteuse à l'achat, du fait d'une puissance électrique limitée.

Cette architecture est aussi une architecture qui est compatible avec les évolutions futures des concepts Néoliner, qui tendront vers des navires 100% zéro-émission à échéance d'une dizaine d'années, tout en étant basée sur des solutions aujourd'hui parfaitement fiables.

2.4. Un navire cargo

Le navire est certes propulsé à l'énergie éolienne mais reste un cargo ayant pour objectif de transporter à moindre coût une cargaison. L'association de la fonction cargo, des contraintes réglementaires, d'un équipage réduit et de la propulsion vélique a conduit à devoir rechercher des solutions architecturales spécifiques à ce type de navire : outre le choix du gréement Duplex précédemment évoqué, la structure de la coque a été conçue pour reprendre les efforts induits par les mâts et les appareils de pont du gréement, de part et d'autre du garage. En outre la mise en œuvre des voiles peut s'effectuer à distance grâce à des bômes orientées par des vérins qui permettent de contrôler la forme des voiles quelle que soit la direction du vent.

Du point de vue de ses espaces de chargement, les efforts de conception ont permis d'atteindre des configurations qui correspondent aux standards logistiques industriels, sans impact des appareils nécessaires à la propulsion vélique. Le navire a ainsi une capacité d'emport de 540 voitures (1500 ml). Mais il a surtout été conçu de manière à pouvoir embarquer des véhicules et colis hors-gabarit jusqu'à 9,8 m de haut et 200 t, s'ouvrant ainsi le marché du fret non-standard. La modularité a également été privilégiée, en travaillant les possibilités d'installation de ponts-mobiles, rendant le navire pertinent pour une large gamme de frets.

2.5. Performances attendues du Néoliner 136 m

Une fois le concept de Néoliner 136 m définitivement arrêté, les études ont pu porter sur la validation des performances sur un cycle d'exploitation, avec la reprise des modèles de routage et son application au Néoliner 136 m finalement retenu.

Un des premiers critères importants pour avoir une première estimation de viabilité

économique du Néoliner a été d'estimer le temps de trajet à la voile seule et de s'assurer que les performances cibles retenues lors de l'élaboration des premières boucles du projet étaient bien respectés.

Dans un second temps, un temps de trajet cible de 292h, correspondant à une vitesse moyenne en route orthodromique de 11 nds a été choisi et une étude de routage avec une propulsion

voile + moteur a permis de valider définitivement la faisabilité du projet.

La Figure 7 permet de comparer les routes issues du routage pour la propulsion à voile seule et du routage avec la propulsion hybride. On peut noter la similitude des deux graphiques. En propulsion hybride, le navire reste principalement à propulsion vélique et garde donc des routes très influencées par les conditions météorologiques

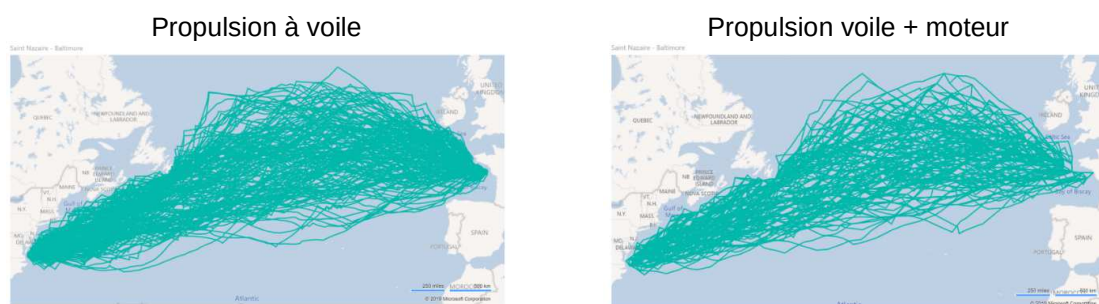


Figure 7: Aperçu des routes issues des études voile et voile + moteur sur le trajet Saint-Nazaire / Baltimore

Les résultats des performances du navire sous voile seule et avec une propulsion moteur en complément sont présentés au Tableau 5. La présence du moteur permet de réduire un peu l'allongement de la route (calculé par rapport à la route orthodromique) et d'augmenter légèrement la vitesse moyenne, tout en assurant un temps de trajet de moins de 292h.

Le moteur permet au Néoliner de naviguer par moments face au vent pour rallier une zone plus favorable et d'augmenter légèrement sa vitesse pour optimiser son vent apparent

(angles serrés), comme on peut l'observer sur la Figure 8. Sur l'aller Saint-Nazaire / Baltimore, le Néoliner a déjà des angles apparents serrés et la présence du moteur ne modifie pas considérablement les points de fonctionnement du navire, seuls les angles apparents ouverts disparaissent. En revanche sur le retour, les angles de vent apparent en fonctionnement avec moteur sont plus localisés et fermés.

Tableau 5 : Comparaison des performances de Néoliner 136 m sous voile uniquement et sous voile + moteur

	Type de propulsion	Saint-Nazaire / Baltimore			Baltimore / Saint-Nazaire		
		Moyenne	Min	Max	Moyenne	Min	Max
Temps de trajet (h)	Voile	335	248	506	319	240	452
	Voile + Moteur	Fixé comme contrainte lors du calcul de routage égal à 292 h					
Vitesse (nds)	Voile	11,8	0,7	17,8	11,6	0,7	17,8
	Voile + Moteur	12,5	2	18	12,3	2	18
Allongement de la route (%)	Voile	13,5	2,2	32,0	7,9	1,2	23,1
	Voile + Moteur	9,3	1,1	24,7	6,5	0,7	17,9

Enfin, il est important d'évaluer la consommation de carburant induite par l'utilisation de la propulsion auxiliaire. Le

Tableau 6 sert de base à cette évaluation. L'hybridation correspond au pourcentage de temps sur trajet pendant lequel la propulsion

mécanique est utilisée en complément de la propulsion vélique. Sur la route Saint-Nazaire / Baltimore, l'assistance mécanique est requise 37,8% du temps et seulement 26,7 % du temps sur la ligne retour.

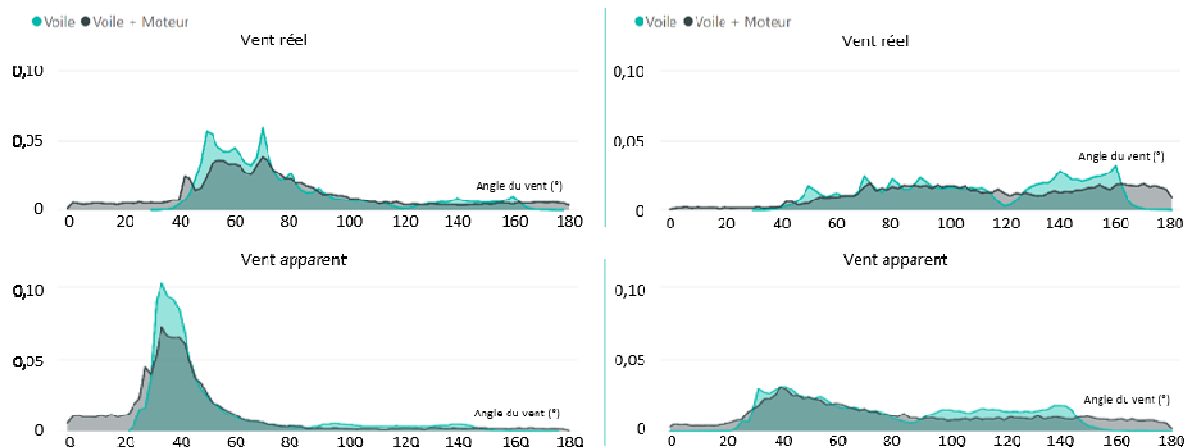


Figure 8 : Analyse des angles de vent vrai et apparent sur les trajets aller-retour

Tableau 6: Analyse de la propulsion hybride

	Saint-Nazaire / Baltimore			Baltimore / Saint-Nazaire		
	Moyenne	Min	Max	Moyenne	Min	Max
Consommation de combustible (t)	40	15,5	98,5	32	13,5	90,6
Hybridation (%)	37,8	1,2	98,6	26,7	0	98,6

A partir des paramètres de l'hybridation (vitesse moyenne cible, vitesse seuil de démarrage du moteur et vitesse au moteur), et des résultats des routages sous voile uniquement, une estimation des puissances moteur nécessaires et du temps de trajet résultant a été effectuée.

Les calculs de puissance sont basés sur la courbe de résistance à l'avancement du navire et le bilan de puissance effectués par MAURIC. Il est alors possible d'estimer la consommation du Néoliner à partir des moyennes de consommation spécifiques fournies par différents constructeurs de

moteurs et de groupes électrogènes. Sur le trajet Saint-Nazaire- Baltimore cette consommation est estimée à 40 t en moyenne et à 32 t sur le trajet retour.

Ces estimations de consommation sont la clé du projet Néoliner. Elles illustrent en effet, la viabilité économique du projet grâce à une propulsion voile + moteur, qui permet une véritable réduction des émissions de GES (près de 90% par rapport à un navire roulier classique effectuant la traversée à 15 nœuds) tout en assurant un temps de transport raisonnable (inférieur à 292 h).



Figure 9 : Le Néoliner 136 m

3. VERS LE TRANSPORT ZERO-EMISSION

Le navire Néoliner 136 m est une première étape qui s'inscrit dans une démarche de NEOLINE visant à proposer des navires de charge zéro-émission à échéance 10 ans. Réaliser un service de transport maritime totalement décarboné impose de combiner plusieurs solutions. L'association négaWatt[12] propose une approche en trois volets : sobriété, efficacité énergétique et énergies renouvelables. Cette approche est applicable au transport maritime et aux navires cargo.

3.1. Sobriété

L'énergie la plus propre est celle que l'on ne consomme pas. La sobriété consiste à prioriser les besoins énergétiques.

La vitesse commerciale a toujours été une variable d'ajustement à disposition des armateurs, de façon à optimiser leur performance économique et commerciale. Souvent située entre 20 et 25 nds au début des années 2000, celle-ci tend aujourd'hui vers les 15 à 20 nds. Cette tendance au « slow steaming » qui consiste à réduire la vitesse commerciale s'est initiée après la crise économique de 2008 et les surcapacités de flotte qui ont suivies [13].

Une réduction de vitesse ne s'accompagne pas forcément d'un allongement des délais de transport. En réalisant des liaisons plus directes, avec peu d'escales et des navires plus petits, il est possible de proposer des délais de transport équivalents. Les grandes lignes souffrent aujourd'hui de la nécessité de massifier au sein de hubs logistiques parfois

éloignés, ce qui allonge le temps de transport global.

La réduction de la vitesse commerciale est le levier le plus direct à la disposition des armateurs pour améliorer la sobriété de leur activité économique.

C'est d'ailleurs un objectif que se sont fixés les pays occidentaux siégeant à la conférence G7, en France, en août 2018, preuve de la pertinence de la démarche initiée par NEOLINE vis-à-vis du marché et des engagements politiques en matière de réduction des émissions.

3.2. Efficacité énergétique

L'efficacité énergétique consiste à réduire la quantité d'énergie nécessaire à la satisfaction d'un même besoin. Intimement liée aux développements et améliorations technologiques, elle doit être réfléchie à différents niveaux.

La conception des cargos doit pleinement intégrer la notion d'efficacité énergétique de la coque jusqu'aux équipements électroniques et mode de propulsion.

Ainsi, une démarche d'optimisation de carène et de ses appendices en fonction de la propulsion comme réalisée pour le Néoliner 136 m est essentielle afin d'améliorer l'efficacité énergétique.

Celle-ci passe aussi par une sélection rigoureuse d'appareils à faible consommation électrique. L'industrie maritime dans son ensemble commence à s'emparer de ces problématiques et des solutions techniques plus sobres apparaissent dans tous les domaines : éclairage basse consommation, modes d'économies d'énergie sur certains appareils, amélioration du rendement des moteurs électrique, monitoring des consommateurs du bord, etc.

Le rendement global de chaque installation doit être surveillé et amélioré. Ainsi de nombreuses solutions sont mises en œuvre comme l'hélice « full feathering » qui permet de mettre l'hélice à un pas zéro et ainsi réduire la traînée induite sous voile.

La récupération des calories dissipées par les groupes électrogènes (circuit de refroidissement et gaz d'échappement) est également prise en compte afin d'améliorer le bilan thermique du bord, réutiliser les

dépense thermiques des et réduire le dimensionnement des Groupes Electrogènes. Ainsi sur le Néoliner 136m, le garage sera maintenu hors gel par la chaleur récupérée sur le circuit de refroidissement des groupes, donc avec un bilan de consommation énergétique quasi-nul.

Enfin l'utilisation de convertisseurs de fréquence sur les équipements de forte puissance est un outil intéressant à intégrer aux navires cargos et qui permet à l'équipage de maîtriser la consommation électrique de ces équipements au juste besoin (régulation du débit de ventilation, pompes, ...)

3.3. Les énergies renouvelables

Sur la ligne pilote Saint-Nazaire / Baltimore, la technologie vélique devrait fournir environ 70% des besoins de puissance du Néoliner 136 m. Un supplément de puissance doit toutefois être produit pour combler les 30 % manquant. Dans un premier temps il a été choisi de fournir cette puissance grâce à une installation motorisation diesel + batteries. Cependant à plus long terme et dans la perspective d'un transport zéro-émission, il sera nécessaire de produire à bord du Néoliner de l'énergie décarbonée.

Ce constat est d'autant plus vrai dans le contexte de l'ouverture d'un service de transport à la voile sur d'autres routes maritimes où l'apport de la propulsion vélique sera plus limité.

La propulsion devra être basée sur un mix énergétique. Les technologies expérimentées actuellement à bord l'Energy Observer[14] offrent un aperçu intéressant de ce qui pourra être intégré aux futurs navires de Néoline. Ce bateau concept étudie ainsi la possibilité d'un mix énergétique basé sur les énergies éolienne, hydrolenne et solaire photovoltaïque et sur la production de dihydrogène par électrolyse de l'eau de mer pour le stockage de l'énergie.

Le routage déjà intégré au concept du Néoliner 136 m devra aussi être exploité pour la production d'énergie. Il ne s'agira plus d'optimiser la route afin de maximiser la propulsion vélique immédiatement utilisée.

L'ensoleillement devra également être pris en compte, de même que l'hydrogénération qui consiste à récupérer l'énergie excédentaire produite à partir de l'énergie éolienne qui n'est pas directement utilisée pour la propulsion et

de la stocker. L'hydrogénération est par exemple au cœur du projet de recherche Farwind [15], qui étudie la possibilité de produire du carburant en mer à partir d'énergie éolienne.

Ces quelques exemples mettent en lumière la problématique des énergies renouvelables qui sont intermittentes et doivent être stockées pour être utilisées au moment opportun. La clef de voute d'un système zéro émission sera donc le stockage d'énergie issue de sources multiples.

Ce stockage pourra se faire sous forme de batteries ou sur forme de stockage d'hydrogène embarqué.

Quelles que soient les solutions qui seront trouvées dans ce domaine, le Néoliner 136m dispose déjà d'une architecture orientée vers de telles évolutions.

4. CONCLUSION

Pour développer une offre véritablement sobre énergétiquement, NEOLINE a fait le choix d'une combinaison de solutions technologiques et opérationnelles, en proposant un mix énergétique innovant qui associe :

- Une propulsion vélique principale, basée sur une énergie inépuisable, gratuite et propre. La propulsion à la voile est une technologie éprouvée, qui bénéficie aujourd'hui d'avancées considérables en performance et en utilisation grâce à une pratique aboutie du routage météorologique, une carène optimisée pour la marche sous voiles et des ailerons antidérive rétractables permettant la remontée efficace au près.
- Un choix de la vitesse commerciale à 11 nds, vitesse cohérente avec le potentiel d'énergie vélique exploitable et un schéma d'exploitation sobre en énergie.
- Une propulsion auxiliaire fiable, qui apporte une vitesse maximum au moteur de 13 à 14 nds, ce qui sécurise la vitesse commerciale et permet d'exploiter tout le potentiel du routage météorologique. Cette propulsion permet aussi d'assurer les manœuvres portuaires en autonomie et de produire l'électricité du bord. L'objectif à plus long terme est de remplacer cette

propulsion auxiliaire par un système de stockage d'énergie renouvelable.

La réussite d'un tel projet repose donc à la fois sur un développement technique et technologique, mais également sur la mise en œuvre de solutions opérationnelles tout aussi importantes.

Les architectes navals, les chantiers, les chargeurs, les armateurs et les marins ont chacun leur rôle à jouer dans la diminution de l'impact environnemental du transport maritime. Une grande sobriété dans la conception et l'exploitation des navires est indispensable pour envisager l'avènement du navire à Zéro émission. Grâce au travail réalisé avec ses partenaires NEOLINE s'apprête aujourd'hui à construire les deux premiers NEOLINER 136 m qui représentent une première étape dans la marche vers le navire de charge au long cours à zéro émission.



Figure 10 : Le Néoliner 136 m

5. REFERENCES

- [1] United Nations, «Review of Maritime Transport,» United Nations Conference on Trade and Development, 2018
- [2] C. Valero, «Une énergie économique et écologique : la force du vent,» Institut supérieur d'économie maritime, Nantes-Saint Nazaire, 2019
- [3] I. Autissier, «Faire évoluer les règles du maritime en fonction de son impact sur l'environnement,» *Revue juridique de l'environnement*, vol. 44, n° 12, pp. 227-230, 2019.
- [4] International Maritime Organization, «Third IMO GHG Study 2014, Executive summary and final report,» IMO, London, 2015
- [5] The Goldman Sachs Groups, Inc., «The IMO 2020: Global Shipping's Blue Sky Moment,» 2018.
- [6] International Maritime Organization (IMO), «Energy Efficiency Measures,» [En ligne].
- [7] International Maritime Organization, «Sulphur oxides (SOx) and Particulate Matter (PM) – Regulation 14,» [En ligne]
- [8] J.-C. Fournier, *Théorie des graphes et applications*, Lavoisier, 2011.
- [9] A. Cirello et A. Mancuso, «A numerical approach to the keel design of a sailing yacht,» *Ocean Engineering*, vol. 35, pp. 1439-1447, 2008.
- [10] F. Cakici, O. Usta, A. Dogrul et S. Bayraktar, «Investigation of the Effects of Different Keel Geometries on a Sailing Yacht,» *19th International Conference on Hydrodynamics in Ship Design & 4th International Symposium on Ship Maneuvering*, 2012.
- [11] B. Axfors et H. Tunander, «Investigation of Keel Bulbs for Sailing Yachts - Master of Science Thesis,» Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden, 2011.
- [12] Association négaWatt, «Scénario négaWatt pour l'industrie française à l'horizon 2050,» Audition à l'assemblée nationale, Paris, 2019.
- [13] H. Lindstad, B. Asbjornslett et A. H. Stromman, «Reductions in greenhouse gas emissions and cost by shipping at lower speeds,» *Energy policy*, vol. 39, n° 16, pp. 3456-3464, 2011.
- [14] R. Chicheportiche, «Energy Observer : Le Solar Impulse des mers,» *Techniques de l'Ingénieur*, 5 Avril 2018.
- [15] G. Clodic, A. Babarit et J.-C. Gilloteaux, «Wind Propulsion Options For Energy Ships,» *1st ASME International Offshore Wind Technical Conference*, 2018.