

LA PROPULSION VELIQUE ET LE COMMERCE MARITIME

Mémoire pour l'obtention du Master II Droit et
Management des Activités Maritimes

Par Charline Bourgeois

Sous la direction de Monsieur le Professeur Cyril
Bloch et de Maître Christophe Thelcide



ANNÉE UNIVERSITAIRE 2019-2020

REMERCIEMENTS

Je remercie dans un premier temps toute l'équipe pédagogique du Pole Transports et Monsieur le Professeur Cyril BLOCH sans qui ce mémoire n'aurait pas d'existence.

Je remercie tout particulièrement Messieurs Michel PERY et Marc VAN PETEGHEM qui ont accepté de m'aider en répondant lors d'entretiens à mes questions. Je remercie également M. Christophe THELCIDE pour sa disponibilité.

Je remercie le Cabinet Favarel & Associés qui m'a permis de participer aux Assises de l'Economie de la Mer 2019 et à l'Euromaritime 2020 où j'ai pu assister aux tables rondes portant sur le sujet du présent mémoire et rencontrer des acteurs de la propulsion vélique qui ont pu m'aiguiller dans mes premières recherches sur le sujet. Je remercie toutes les autres personnes qui m'ont aidé de près ou de loin à la rédaction de ce mémoire, notamment les entreprises qui ont accepté de répondre à certaines de mes questions de façon informelles lors des événements précédemment cités.

Je remercie également mon réseau nantais, Elise LEROUX, Emilie HERAUT, Manon BESSON et Fidèle GNAKOU, toujours présentes pour m'aider. Je remercie mon acolyte sparnacien Eddy HABIB pour sa relecture.

Je remercie pour finir, mes camarades de promotion, ma famille et mon entourage pour leur soutien et leur aide dans la rédaction de ce mémoire.

SOMMAIRE

Introduction.....	8
Partie 1 : La propulsion vélique : une opportunité économique pour le commerce maritime	25
Titre 1 : Un potentiel important du développement de la propulsion vélique	25
Chapitre 1 : L'évident potentiel de la propulsion vélique	26
Chapitre 2 : Un potentiel à mettre en comparaison avec d'autres moyens de propulsion innovants	33
Titre 2 : Des barrières structurelles au développement de la propulsion vélique	36
Chapitre 1 : Une émergence difficile de la propulsion vélique	36
Chapitre 2 : Un développement difficile des projets de propulsion vélique	46
Partie 2 : La propulsion vélique : un bouleversement juridique pour le commerce maritime	59
Titre 1 : La conception du navire à propulsion vélique	59
Chapitre 1 : Divers acteurs dans la prise en compte de la sécurité dans la conception du navire vélique	59
Chapitre 2 : De nombreuses problématiques de sécurité liées aux équipements véliques.....	66
Titre 2 : L'exploitation du navire à propulsion vélique.....	73
Chapitre 1 : La formation des équipages.....	73
Chapitre 2 : La navigation maritime d'un navire à propulsion vélique.....	77
Conclusion.....	84

TABLE DES ABREVIATIONS

ABS	American Bureau of Shipping
AIS	Automatic Identification System (Système d'identification automatique)
BV	Bureau Veritas
CCS	Commission Centrale de Sécurité
COLREG	International Regulations for Preventing Collisions at Sea (Règlement international pour prévenir les abordages en mer (RIPAM))
CORSIA	Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation (Régime de compensation et de réduction de carbone pour l'aviation internationale)
DNV GL	Det Norske Veritas – Germanischer Lloyd
ECA	Emission Control Area
EEDI	Energy Efficiency Design Index (Indice nominal de rendement énergétique)
ETA	Estimated time of arrival
EVP	Equivalent vingt pieds
GES	Gaz à effet de serre
GNL	Gaz Naturel Liquéfié
IACS	International Association of Classification Societies

	(Organisation internationale de sociétés de classification)
IAPP	International Air Pollution Prevention Certificate (Certificat International de prévention de la pollution atmosphérique)
<i>Ibid.</i>	<i>Ibidem</i>
<i>Id.</i>	<i>Idem</i>
Code IMDG	International Maritime Dangerous Goods Code (Code maritime international des marchandises dangereuses)
ISEMAR	Institut Supérieur d'Économie Maritime
Code ISM	International Safety Management Code (Code international de gestion de la sécurité)
IWSA	International Windship Association
<i>JOUE</i>	<i>Journal Officiel de l'Union Européenne</i>
Lloyds Rep.	Lloyds Report
MARPOL	International Convention for the prevention of marine pollution from ships (Convention internationale pour la prévention de la pollution par les navires)
MLC	Maritime Labour Convention
MoU	Memorandum of Understanding (Mémorandum d'accord)
MRV	Monitoring, Reporting and Verification (Surveillance, Déclaration et Vérification)
MSC	Mediterranean Shipping Company

NKK	Nippon Kaiji Kyokai
NYPE	New York Produce Exchange Form
OACI	Organisation de l'aviation civile internationale
OMI	Organisation Maritime Internationale
SECA	Sulphur Emission Control Area (Zone de contrôle des émissions de soufre)
SEEMP	Ship Energy Efficiency Management Plan (Plan de gestion du rendement énergétique du navire)
SOLAS	Convention on safety of life at sea (Convention internationale sur la sauvegarde de la vie humaine en mer)
STCW	International Convention on Standards of Training, Certification and Watchkeeping for Seafarers (Convention internationale sur les normes de formation des gens de mer, de délivrance des brevets et de veille)
UE	Union européenne
WASP	Wind Assisted Ship Propulsion

INTRODUCTION

L'expression « *Scharnow Turn* » est fréquemment utilisée¹ pour parler du changement réglementaire actuel concernant la protection de l'environnement dans le commerce maritime. Ce terme désigne en navigation la manœuvre réalisée par un navire pour sauver un homme tombé à la mer. Le constat est en effet que les activités humaines, dont fait partie le commerce maritime ont des effets négatifs sur l'environnement et une action humaine doit être mise en œuvre pour réduire cet impact et préserver l'environnement.

Face aux problématiques environnementales posées par le transport maritime de marchandises, les armateurs recherchent des alternatives aux pratiques polluantes actuelles. Plusieurs nouveaux usages se sont ainsi développés. Les navires à voile connaissent ainsi une résurgence dans le milieu du transport de marchandises après avoir été écartés au profit de moyens de propulsions plus efficaces.

Diverses entreprises développant la propulsion vélique sont en train d'émerger. Neoline, Zephyr et Borée, TOWT...etc, tous ces noms se distinguent progressivement dans la communauté maritime et ont pour ambition de se faire une place par un nouveau modèle de propulsion à la fois ancien et récent, le vent.

Ce mémoire a donc pour vocation d'étudier le développement de ce moyen de propulsion et les différentes barrières qui se trouvent face à lui dans la mise en œuvre des projets. Mais également, les différentes questions juridiques et opérationnelles posées par ces nouvelles techniques. Il s'agira donc d'étudier le navire vélique tout au long de sa vie et de son développement, phase à laquelle la plupart des projets sont à présent, jusque sa conception et construction puis son exploitation.

¹ K. ANDERSON, A. BOWS, Executing a Scharnow Turn : Reconciling Shipping Emissions with International Commitments on Climate Change, *Carbon Management*, n°6, 2012, p.615-628

I. Historique de la propulsion vélique : Des innovations basées sur une technique ancienne

La propulsion vélique a été la propulsion dominante dans le commerce maritime pendant la plus grande partie de l'histoire du commerce maritime. Les premières traces de navires à voile se retrouvent sur des céramiques en Europe de l'Est datant du néolithique au 6^e millénaire avant notre ère². La voile se développe ensuite pendant l'Antiquité où divers récits de l'Antiquité grecque ou romaine font état de voiliers traversant la mer Méditerranée à l'instar du mythe d'Égée où la couleur des voiles du navire de son fils Thésée revenant de son affrontement avec le minotaure pousse Égée au suicide. La voile est donc un moyen de propulsion particulièrement ancien.

Les voiliers sont ainsi la propulsion dominante lors de l'essor du commerce maritime tel que nous le connaissons actuellement, débuté avec la découverte des Amériques et l'accélération des échanges entre les continents. Mais, avec les grandes découvertes et notamment celle de la machine à vapeur au XVIII^e siècle après JC, la voile se fait peu à peu remplacer par des modes de propulsion nouveaux. Victor Hugo témoigne de cette transition dans son œuvre « Les travailleurs de la mer » où il fait état de l'attitude de la population face à cette nouveauté : « *Les savants avaient rejeté le bateau à vapeur comme impossible ; les prêtres à leur tour le rejetaient comme impie. La science avait condamné, la religion damnait. [...] En présence du bateau à vapeur, le point de vue religieux était ceci : – L'eau et le feu sont un divorce.* »³. Le divorce historique fut cependant celui de la voile et du commerce maritime. Pourtant, la vapeur était initialement destinée à n'être qu'un moyen de propulsion assistant la propulsion principale qui resterait la voile, permettant une plus grande manœuvrabilité du navire et d'augmenter la vitesse du navire. Cependant, atteignant une maturité technologique la vapeur est devenue la norme malgré des tentatives de la voile de garder sa place dominante notamment avec le développement du Clipper⁴. Mais la vitesse des navires

² M. GIMBUTAS, « *The goddesses and gods of Old Europe, 6500–3500 BCE: myths and cult images* », Berkeley: University of California Press, 2007, p. 18 : « *The use of sailing-boats is attested from the sixth millennium onwards by their incised depiction on ceramics.* »

³ V. HUGO, « *Les travailleurs de la mer* », Le livre de Poche, 2002, p.94-95

⁴ Navire à voile pouvant aller à de plus grandes vitesses, en moyenne 9 nœuds.

à vapeur et les coûts de main d'œuvre moindre ont permis à ces navires de s'imposer. La voile disparaît rapidement des navires de commerce pour ne se retrouver que sur des navires de plaisance. Les navires à vapeur sont également rapidement rendus obsolète par la propulsion mécanique au XX^e siècle.

La simple émergence de ces nouveaux moyens de propulsion n'explique pas en elle-même la disparition de la voile. Cette dernière était confrontée à des problématiques intrinsèques qui ne lui permettait que difficilement de répondre aux nouveaux besoins des marchands et des populations. En effet, jusque lors les navires ne transportaient que des individus et des biens à forte valeur ajoutée entre les territoires, la vitesse de ces navires et de ces voyages n'avait donc que peu d'importance⁵. Or, les exigences du commerce maritime grandissant, les navires à voile ne pouvaient y répondre par des améliorations technologiques contrairement à leurs concurrents. La voile était donc confrontée à des limites comme la faible vitesse, l'ETA incertain, la main d'œuvre importante...etc⁶

La propulsion par le vent se retrouve cependant dans certains projets du XX^e siècle de façon assez marginale avec les prémices de la propulsion vélique telle que nous le connaissons aujourd'hui. Les Rotors Flettner naissent ainsi dès les années 1920. Les crises pétrolières des années 1970 donnent un regain d'intérêt à ces nouvelles technologies, les armateurs souhaitant trouver une alternative aux carburants devenus trop coûteux par la crise. Plusieurs projets ont été menés, à l'instar du navire *Shin Aitoku Maru* construit en 1980 équipé d'ailes rigides. Plusieurs études sur les performances et leur introduction sur le marché du commerce maritime ont également été menées à la suite de la crise dans les années 1980⁷. Mais, cet intérêt ne s'est pas traduit par un développement à une échelle importante de ces moyens de propulsion restant marginaux. Une fois la crise passée, l'intérêt des armateurs s'est évanoui également⁸.

⁵ E&E CONSULTANT « Wind propulsion technologies review », Octobre 2013, p.7

⁶ Ibid E&E CONSULTANT p.9

⁷ L. BERGESON, C. KENT GREENWALD, Sail Assist Developments 1979-1985, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, n°19, 1985 p.45-114 ; R. DUCKWORTH, The application of elevated sails (kites) for fuel saving auxiliary propulsion of commercial vessels, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, n°20, 1985, p. 297-315

⁸ S. MANDER, Slow steaming and a new dawn for wind propulsion : A multi level analysis of two carbon shipping transitions, *Marine Policy*, n°75, 2017, p. 5



Maquette du Shin Aitoku Maru, Royal Museum of Greenwich

Ces méthodes de propulsion véliques connaissent aujourd'hui une résurgence, notamment en France et en Europe, face au contexte réglementaire environnemental.

II. Contexte de la propulsion vélisque : Une technique résurgente au service des nouveaux besoins du commerce maritime

Le transport maritime nécessite actuellement un changement de paradigme en termes de carburant puisque ce secteur est dépendant en grande partie des énergies fossiles, notamment du fioul lourd, aujourd'hui considérées comme trop polluantes. La flotte mondiale du commerce maritime émet, en effet, une quantité non négligeable d'oxydes d'azote (NOx), de dioxyde de soufre (SOx) et de dioxyde de carbone (CO2) dans l'atmosphère⁹. Le commerce maritime contribue donc en partie aux changements climatiques même si cela est à relativiser par rapport à la quantité de marchandises transportées¹⁰. Si le transport maritime est le moyen de transport le moins dommageable pour l'environnement à la tonne transportée par rapport à ses homologues routiers et aériens, son impact n'est pas pour autant à négliger et doit, comme pour les autres secteurs polluants, faire l'objet d'une réglementation.

Le secteur du commerce maritime étant internationalisé, il était nécessaire d'adopter une réglementation internationale au sein de l'Organisation Maritime Internationale (OMI), institution spécialisée des Nations Unies pour l'unification de la réglementation maritime, la réglementation française ne pouvant réguler que les échanges maritimes internes et donc le cabotage, secteur limité du commerce maritime¹¹. L'OMI s'est donc progressivement intéressée à cette question de la pollution atmosphérique du transport maritime. Dès la conception de la Convention MARPOL¹² sur les pollutions marines, cette problématique était discutée et il était envisagé de l'intégrer dès son origine à la

⁹ L. GRARD, Fabrication régionale d'un « droit maritime du climat » ou d'un « droit climatique du transport maritime »?, *DMF*, n°815, 1^{er} juillet 2019, p.616 : « *En raison de sa dépendance aux carburants fossiles, parce qu'il demeure le secteur où les émissions sont les moins contrôlées, le transport maritime contribue significativement au changement climatique et à la pollution de l'air. Pour autant, il demeure aujourd'hui le mode de transport le plus propre, le plus « climat compatible » à la tonne transportée, avec cinq fois moins d'émissions de CO2 que le transport routier et treize fois moins que l'aérien* »

¹⁰ En 2018, 11 005 t chargées, tous types de navires confondus, CNUCED, « Etudes sur les transports maritimes 2019 », 2019, p.23

¹¹ En ce sens, article L.222-1 A du Code de l'environnement fixant le plafond national des émissions de gaz à effet de serre et son décret d'application l'article D 222-1-A, excluant le transport maritime international du « budget carbone » de la France

¹² OMI, Convention internationale pour la prévention de la pollution par les navires (MARPOL), adoptée le 2 novembre 1973, entrée en vigueur le 2 octobre 1983.

Convention. Mais, face aux multiples pollutions par hydrocarbures de l'époque et la pression sociétale sur cette question, le choix de ne se concentrer que sur les pollutions par hydrocarbure a été fait¹³.

Le travail de l'OMI sur les pollutions atmosphériques a toutefois continué pour aboutir à l'Annexe VI de la Convention MARPOL de 2005, modifiée en 2008¹⁴ qui prévoit un plafonnement des émissions polluantes du transport maritime. Cette Annexe est contraignante pour les parties. Ce plafonnement devant être réalisé selon un calendrier précis, cette réglementation exerce une pression sur les armateurs pour trouver des alternatives à l'exploitation classique des navires de commerce utilisant du fioul lourd afin de réduire les émissions de leurs navires. Selon l'Annexe VI telle que modifiée en 2008, les émissions de soufre ne doivent pas dépasser 3,5% à partir du 1^{er} janvier 2012¹⁵, puis 0,5% le 1^{er} janvier 2020¹⁶. En 2008, est ajouté le Code technique sur les NOx¹⁷ prévoyant des limitations d'émissions selon la période de construction du navire. L'annexe VI de la Convention MARPOL telle que révisée en 2008 fixe également des « *Emission Control Area*¹⁸ » (ECA) qui sont des zones où les émissions doivent être réduites encore plus que ce qui est normalement prescrit par la Convention. Ainsi pour les SECA, soit les zones de contrôle des émissions de soufre, le taux est de 0,1% alors qu'il est actuellement de 0,5% en dehors de ces zones depuis janvier 2020. Ces taux faibles ont ensuite vocation à devenir progressivement la norme. De plus, les armateurs battant pavillon d'un Etat partie à l'Annexe VI doivent obtenir auprès d'une société de classification le certificat IAPP (Certificat International de prévention de la pollution atmosphérique).

¹³ L. FEDI, Le transport maritime international face à la pollution atmosphérique : enjeux du 21^e siècle, *DMF*, n°737, Juin 2012, p.491

¹⁴ OMI, Protocole de 1997 modifiant la Convention internationale de 1973 pour la prévention de la pollution par les navires, telle que modifiée par le protocole de 1978 y relatif, adopté le 26 septembre 1997, entré en vigueur le 19 mai 2005.

OMI, Résolution MEPC.176(58) adoptée le 10 octobre 2008, Amendements à l'annexe du protocole de 1997 modifiant la Convention internationale de 1973 pour la prévention de la pollution par les navires, telle que modifiée par le protocole de 1978 y relatif.

¹⁵ Règle VI/14 §1.2

¹⁶ Règle VI/14 §1.3

¹⁷ OMI, Résolution MEPC.177(58) adoptée le 10 octobre 2008, Code technique sur les NOx

¹⁸ Zone de contrôle des émissions (par exemple : la Mer du Nord ou encore la Mer Baltique)

Un nouvel amendement à l'Annexe VI de la Convention MARPOL cherche à aller encore plus loin en 2011¹⁹ instaurant l'EEDI (*Energy Efficiency Design Index*²⁰) pour les nouveaux navires à partir du 1^{er} janvier 2013 et le SEEMP (*Ship Energy Efficiency Management Plan*²¹) pour les navires préexistants. Ces instruments réglementaires, bien que non contraignants, incitent à un changement des habitudes des armateurs pour équiper les navires de matériaux et d'équipements plus économes en énergie afin de réduire les émissions et correspondre aux dispositions de l'Annexe VI de la Convention MARPOL. L'EEDI notamment est particulièrement intéressant au regard du développement de la propulsion vélique. Ces instruments laissent une liberté de choix des outils à utiliser pour parvenir aux objectifs mais la propulsion vélique n'émettant pas de SO_x, de NO_x comme de CO₂ permet d'obtenir de bons résultats au regard de l'EEDI. Plus généralement, cette réglementation est également la traduction juridique d'une prise de conscience sociétale de l'impact des activités humaines sur l'environnement. L'adoption d'alternatives plus durables par les armateurs, mais également par les chargeurs dans leur chaîne logistique, est donc également le fait d'une pression par l'opinion publique. Plusieurs chargeurs sont soucieux des questions environnementales et ont développé une image autour du transport écologique de leurs produits, à l'instar d'Ikea ou de Electrolux faisant partie, parmi d'autres, du *Clean Cargo Working Group*²². Les alternatives écologiques ont donc vocation à se développer davantage sous la pression de l'opinion publique et des stratégies des chargeurs et des armateurs.

L'Union Européenne complète les travaux de l'OMI considérant que ces dispositions sont encore insuffisantes pour répondre aux objectifs fixés lors de la COP21 à Paris, soit une limitation de l'augmentation de la température mondiale à 2°C. Pour ce faire, l'Union Européenne a donc adopté ses propres mesures visant à réduire les émissions atmosphériques dans le secteur maritime. Dès 2012, l'Union européenne a ainsi pris une Directive visant à la réduction des émissions de soufre plus stricte que les prescriptions

¹⁹ OMI, Résolution MSC.203(62) adoptée le 15 juillet 2011, Amendements à l'annexe du protocole de 1997 modifiant la convention internationale de 1973 pour la prévention de la pollution par les navires, telle que modifiée par le protocole de 1978 y relatif.

²⁰ Indice nominal de rendement énergétique

²¹ Plan de gestion du rendement énergétique du navire

²² Groupe de travail pour un transport maritime propre

de l'OMI notamment par son champ d'application plus vaste²³. Le Parlement européen et le Conseil ont également adopté en 2015 un règlement²⁴ instaurant le système MRV (« *Monitoring, Reporting and Verification*²⁵ »). Ce Règlement vise ainsi à mettre en place un système fiable quantifiant les émissions de CO2 des navires. Cet instrument est un préalable avant une future tarification des émissions de CO2 au sein de l'Union européenne reposant sur le principe pollueur-payeur²⁶. Ce Règlement a un champ d'application large ne s'arrêtant pas aux émissions des seuls navires sous pavillon européen, il s'applique en effet aux « *navires d'une jauge brute supérieure à 5 000, pour ce qui concerne les émissions de CO2 produites lors de leurs voyages entre leur dernier port d'escale et un port d'escale relevant de la juridiction d'un État membre et entre un port d'escale relevant de la juridiction d'un État membre et leur port d'escale suivant, ainsi qu'à l'intérieur de ports d'escale relevant de la juridiction d'un État membre.*²⁷ ». Ce Règlement se limite à la quantification des émissions de CO2, gaz à effet de serre sur lequel l'OMI n'applique pas de limitation alors qu'il est le gaz à effet de serre principalement rejeté par les navires, les émissions de CO2 ne sont concernées que par les systèmes EEDI et SEEMP au niveau de l'OMI.

Les navires sont donc de plus en plus encadrés pour limiter les émissions, les armateurs se doivent d'innover. Ceux-ci ont une tendance à s'orienter vers des innovations déjà populaires tels que le GNL ou les scrubbers, mais la propulsion vélique est une de ces innovations, encore peu répandue, qui permettent de répondre au mieux à toutes ces exigences. Les années futures devraient ainsi voir la propulsion vélique se développer davantage sous l'impulsion de ces réglementations. La perspective du développement futur de la propulsion vélique amène, de ce fait, à s'interroger sur l'opportunité de cette dernière dans le secteur du commerce maritime et des problématiques qu'elle peut poser par son exploitation.

²³ Directive 2012/33/UE du Parlement Européen et du Conseil du 21 novembre 2012 modifiant la directive 1999/32/CE en ce qui concerne la teneur en soufre des combustibles marins

²⁴ Règlement (UE) n°2015/757 du Parlement européen et du Conseil du 29 avril 2015 concernant la surveillance, la déclaration et la vérification des émissions de dioxyde de carbone du secteur du transport maritime et modifiant la directive 2009/16/CE, JOUE L 123 du 19 mai 2015, p.55-76

²⁵ Surveillance, déclaration et vérification

²⁶ L. FEDI, La surveillance, la déclaration et la vérification des émissions de CO2 du transport maritime, *DMF*, n°787, Janvier 2017, p. 7-19

²⁷ Règlement (UE) n°2015/757, Article 2

III. Etat de la propulsion vélique aujourd'hui : une diversité de moyens

La propulsion vélique aujourd'hui regroupe différentes applications modernes de concepts anciens. Derrière cette notion de « propulsion vélique » se cache en réalité une véritable pluralité de techniques différentes utilisant le vent comme source d'énergie propulsive. Mais, ces techniques se ressemblent par la modernité qu'elles tentent d'apporter à la propulsion vélique et leur volonté de changer le fonctionnement du transport maritime en le rendant plus économique et écologique.

La maturité technologique de ces technologies est très variable, allant de simples concepts à des installations complètes sur des navires fonctionnels. Il est néanmoins nécessaire pour saisir les enjeux de ces moyens de propulsion de comprendre leur fonctionnement et les distinctions entre ces différentes techniques.

Deux catégories ressortent des différents projets de transport maritime par le vent, les armateurs peuvent faire le choix d'une propulsion principale ou d'une propulsion vélique d'assistance. Ce choix n'est pas anodin, nous distinguerons pour la présentation des divers moyens de propulsions d'abord les projets de propulsion vélique principale avant de présenter plus globalement les diverses méthodes.

A. Des projets de voiliers cargos à propulsion principale vélique limités

Les projets actuellement les plus aboutis sont ceux misant sur une propulsion vélique principale à l'instar de Neoline, TOWT, Grain de Sail...etc. Mais ces projets sont plus rares et restreints à des cargos dont le type et la taille sont limités. L'utilisation de la propulsion vélique comme propulsion principale est possible pour les voiles ou ailes et les Rotor Flettner, mais pas pour les kites²⁸.

²⁸ CE DELFT, « *Study on the analysis of market potentials and market barriers for wind propulsion technologies for ships* », Novembre 2016, p.76

Parmi ces projets de propulsion vélique principale, deux catégories se distinguent. Il y a d'un côté ceux réutilisant simplement la méthode ancestrale de transport maritime, le voilier classique. Ces projets se retrouvent notamment au sein de la Cargo Sail Alliance.

La société TOWT possède une dizaine de voiliers traditionnels transportant des marchandises sur plusieurs routes prédéfinies : transmanche, transatlantique et transgascogne. Cependant, elle se développe actuellement vers des cargos véliques équipés de technologies plus modernes et avec une plus grande capacité de chargement. Ainsi, comme la société Grain de Sail dont le premier voilier cargo vient de sortir de chantier, la société TOWT ne transporte que des marchandises à haute valeur ajoutée mises en vente sur sa propre boutique en ligne (café, spiritueux, chocolat...). Ainsi, ils sont à la fois chargeurs et transporteurs. La société TOWT a donc comme projet de construire un voilier cargo semi automatisé en complément de ses voiliers classiques, permettant de transporter 1 000t de marchandises conditionnées. Le voilier cargo conçu par Grain de Sail a quant à lui été construit conformément aux normes des navires de charge du Bureau Veritas et a une capacité d'emport de 35t de marchandises en palettes²⁹. Ces capacités de chargement sont bien en dessous des pratiques du commerce maritime actuel.

La société nantaise Neoline répond également au même défi de la propulsion vélique principale avec son projet de navire Neoliner. Neoline a déjà signé une lettre d'intention de commande avec le chantier Neopolia³⁰. Le groupe Renault a apporté son soutien en signant un partenariat avec la société nantaise en vue de transporter des véhicules Renault jusqu'aux îles Saint Pierre et Miquelon sur des rouliers à voile dans le futur³¹. Neoline a fait le choix d'une propulsion vélique principale avec des capacités de chargement plus importantes, 5 000t pour leur premier navire roulier, afin d'augmenter les économies d'énergie du navire. Mais ce choix se fait au détriment de la vitesse puisque en utilisant plus la propulsion vélique le navire perd en vitesse.

²⁹ J. BEQUIGNON, « *Un grain de Sail dans le café* », La Mer, Notre Avenir, n°18, Novembre 2019, p.6

³⁰ Le Marin, « *Neoline signe une lettre d'intention de commande avec Neopolia* », Le Marin, 1 Juillet 2019, <https://lemarin.ouest-france.fr/secteurs-activites/chantiers-navals/34562-neoline-signe-une-lettre-dintention-de-commande-avec> (Consulté le 16.02.2020)

³¹ *Ibid.* J. BEQUIGNON, « *Un grain de Sail dans le café* »

Même si la propulsion vélique principale ne concerne pas que des voiliers traditionnels et que des projets plus conséquents réfléchis pour un transport de marchandises à plus grande échelle ont été développés, ces exemples montrent que cette méthode est encore aujourd'hui restreinte à des marchandises particulières et ne concurrence pas en quantité les moyens de transport de marchandises classiques pour des transports réguliers. En effet, les échelles sont totalement différentes, rappelons que les plus grands porte-conteneurs peuvent aujourd'hui transporter plus de 20.000 EVP, bien loin des 1.000t prévues par Neoline ou 35t par Grain de Sail, les marchés de ces sociétés sont donc limités.

Si ces projets ont un intérêt certain, l'intérêt de la propulsion vélique dans le modèle actuel du transport maritime est surtout celui de l'hybridation des navires permettant d'envisager la propulsion vélique sur des échelles beaucoup plus conséquentes. Le vélique apporte donc davantage une assistance à un autre moyen de propulsion, plus qu'un changement de paradigme total de la propulsion maritime.

B. Une pluralité de méthodes

1. Propulsion assistée par kites

La production d'énergie par *kite* existe déjà à terre³², il est naturel de voir cette technologie se développer en mer comme propulsion des navires.

Cette technologie consiste en un grand cerf-volant situé à l'avant du navire qui tracte le navire lorsque les vents sont propices. Ce *kite* peut monter à une altitude importante lui permettant de bénéficier des vents plus forts tout en gardant une taille raisonnable.

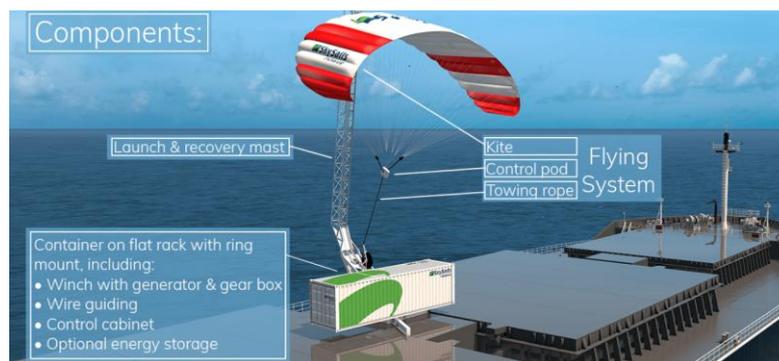
³² M. LOYD, Crosswind kite power, *J Energy*, Vol. 4, n°3, n°80-4575, 2012

Voir notamment les projets de production d'électricité par kite par la société Kite Power aux Pays-Bas

Les projets actuels de traction par kite – En France, cette technologie est principalement portée par la société Beyond the Seas qui effectue de la recherche et développement sur cette technologie pour la CMA CGM³³.

Le précurseur dans le domaine fut la société allemande Skysails fondée en 2001. Elle a pu lancer en 2007 un premier navire cargo utilisant la technologie du *kite* comme système de traction, le navire *Beluga Skysails*. Le navire a été récemment vendu³⁴, il est incertain que l'équipement vélique soit toujours installé en son bord et utilisé en ce que le site internet de la société Skysails ne mentionne plus ce navire et peu d'informations sont disponibles sur celui-ci depuis sa vente. La société a toutefois d'autres partenariats en cours notamment avec la Compagnie allemande Wessels.

Des projets de générateur auxiliaire utilisant un kite - La société Skysails s'est développée sur d'autres domaines que la propulsion assistée par l'utilisation du vent. Plus récemment, elle a développé des projets de générateurs auxiliaires placés sur le navire permettant de générer de l'électricité pour alimenter le navire. Le système est ici placé au centre du navire, encombrant toutefois l'espace de cargaison davantage que le système de traction.



Générateur auxiliaire vélique
Crédit Photo : Skysails.com

Typologie – Deux types de *kites* existent : les *kites* dynamiques et les *kites* statiques³⁵. Le premier produit une puissance motrice plus importante pouvant s'adapter aux vents pour bénéficier d'une meilleure capacité de traction. Le projet de kites Skysails fait

³³ H.M. THOMAS, « Un porte-conteneurs de CMA CGM équipé d'un kite à l'horizon 2020 », Le Marin, 31 mai 2018, <https://lemarin.ouest-france.fr/secteurs-activites/nautisme/31526-un-porte-conteneurs-de-cma-cgm-sous-voile-echeance-2020>, (Consulté le 16/04/2020)

³⁴ Source Equasis

³⁵ E&E CONSULTANT « Wind propulsion technologies review », Octobre 2013, p. 23

partie de cette première catégorie. La technique utilisée est ici de permettre au kite de faire un 8 une fois déployé pour générer davantage de capacité de traction.

Le second est comme indiqué par son nom, immobile une fois déployé, il nécessite ainsi moins de manipulations puisqu'il n'a pas besoin d'être ajusté au gré des vents. Mais cette technique perd ainsi de capacité de traction par rapport aux *kites* dynamiques. La capacité de ces seconds va dépendre de la géométrie du *kite*, là où les performances du premier dépendent de son adaptation aux vents, les manipulations des *kites* « dynamiques » sont donc primordiales aux performances réalisées. De plus, les *kites* statiques ne pourront être utilisés que lorsque le navire navigue dans le sens du vent pour en bénéficier.

Contrôle des kites – Il est généralement prévu dans les projets de *kite* actuels de les contrôler depuis le pont. Le projet Skysails prévoit un contrôle depuis le pont et l'espace de lancement du kite. La gestion opérationnelle du *kite* une fois déployé, se fait au pont par un système automatisé d'autopilote censé s'adapter de lui-même aux conditions météorologiques³⁶.

Avantages - Ce système peut ainsi s'installer sur tout type de navire, notamment des portes conteneurs, permettant de réduire les consommations de fioul et les émissions polluantes du navire. La technologie Skysails est également prévue comme adaptable aux navires préexistants³⁷. Leur placement permet, contrairement aux autres technologies, de libérer le pont ce qui représente un avantage considérable limitant le tirant d'air du navire et facilitant la manutention.

³⁶ SKYSAILS, « New Energy For Shipping : Press Kit », Janvier 2011, p.5

³⁷ *Idem*, p.2

2. Propulsion par Rotor Flettner

Historique - Les Rotors Flettner ont été inventés par l'allemand Anton FLETTNER en 1922³⁸. Ces grands cylindres lisses tournent sur eux-mêmes et créent ainsi de l'énergie grâce à l'effet Magnus³⁹.

Cette technologie a été testée sur plusieurs navires au début du XXe siècle mais a rapidement été abandonnée ne pouvant concurrencer les autres moyens de propulsion de l'époque. Ces cylindres peuvent être fixes, télescopiques ou encore pliables⁴⁰.

Les projets de rotors Flettner actuels - Elle connaît aujourd'hui un regain de popularité notamment avec la compagnie Norsepower ayant équipé déjà 3 navires de rotors Flettner notamment le tanker *Maersk Pelican*. La société Enercon a également mis à l'eau en 2008 son navire *E Ship I* doté de Rotors Flettner pour le transport d'éoliennes.⁴¹ A titre d'exemple, le navire *E Ship I* est ainsi doté d'une propulsion principale hybride fioul et électrique⁴² assistée de quatre Rotors Flettner installés sur le pont.

L'automatisation de ces moyens de propulsion est relativement simple puisque seule la vitesse de rotation des Rotors doit être contrôlée⁴³, les Rotors du navire E-Ship I sont ainsi totalement automatisés, la vitesse de rotation est établie selon les conditions

³⁸ G.B.SEBOLD, A Sailing Ship Without Sails: New Wonder of the Seas, *Popular Science Monthly*. Février 1925

³⁹ « Lorsque le vent entre en contact avec un cylindre en rotation, celui-ci s'écoule à des vitesses relatives différentes lorsqu'il passe de chaque côté. Cette différence de vitesse se traduit par une différence de pression, créant une force perpendiculaire à la direction du vent », Energies de la mer, « A voiles et à moteurs : Le Rotor Sail de Norsepower Oy est homologué », 7 mars 2019, <https://www.energiesdelamer.eu/publications/59-navires-installateurs/5114-voile-moteur-rotor-norsepower-oy> (Consulté le 15/02/2020)

⁴⁰ Lloyds Register, « Wind-power shipping : a review of the commercial, regulatory and technical factors affecting uptake of wind assisted propulsion », Février 2015, page 10

⁴¹ Enercon, « Enercon Presentation », 4st Conference on ship efficiency, Hambourg, Allemagne, 23-24 Septembre 2013

⁴² *Idem*

⁴³ G. CLODIC, A. BABARIT, J.C. GILLOTEAUX, « Wind propulsion options for energy ships », Proceedings of the 1st International Offshore Wind Technical Conference, San Fransisco, Californie, Etats-Unis, 4-7 Novembre 2018, page 5

météorologiques. La société Enercon ne recrute ainsi aucun membre de l'équipage spécialisé pour le contrôle et la maintenance de ces équipements⁴⁴.



Navire *Maersk Pelican*

Crédit photo : WorldMaritimeNews.com



Navire *E-Ship 1*

Crédit photo : Présentation Enercon,

4^e conférence sur l'efficacité des navires, 2013

L'inconvénient de tels moyens de propulsion est cependant sa consommation d'énergie qui est de « 80kW pour un rotor de 5 mètres de diamètre et 30 mètres de hauteur »⁴⁵. Il a cependant été établi que les Rotors Flettner comparés à des technologies de propulsion par voiles rigides (Dynarig et Wingsail), présentent de meilleures performances en termes d'économie de carburant⁴⁶.

⁴⁴ *Ibid*, Enercon, p.22

⁴⁵ *Idem*

⁴⁶ R. LU, J.W. RINGSBERG, « Ship energy performance study of three wind-assisted ship propulsion technologies including a parametric study of the Flettner rotor technology », *Ships and Offshore Structures*, 2020, Vol.15 n°3, p.249-258 : étude réalisant des prédictions de performance pour 3 technologies d'assistance vélique (Rotors Flettner, DynaRig et Wingsail) sur un tanker Aframax (80 000 tonnes - 120 000 tonnes) pour deux voyages sur deux routes différentes.

3. Propulsion par voile

Les voiles des projets actuels de propulsion vélique ne sont rien de plus que des adaptations modernes des techniques plus anciennes. Comme les modèles précédemment présentés d'entreprises telles que Neoline ou TOWT, ces technologies utilisent des voiles, ou ailes mais cette propulsion n'est qu'auxiliaire à un moyen de propulsion principal autre. Ces projets, dont la plupart font l'objet d'une automatisation, sont les plus présents lorsque l'on parle de propulsion vélique aujourd'hui⁴⁷. Ces technologies sont donc en passe d'atteindre une maturité technologique leur permettant un plus grand développement dans l'industrie du commerce maritime.

Les navires véliques peuvent être équipés de voiles souples avec des matériaux innovants mais aussi de voiles rigides, également appelées ailes. Contrairement aux voiles souples conventionnelles, ces ailes rigides, parfois équipées de volets mobiles positionnés sur le pont du navire. Le nombre de ces ailes dépend du navire et de sa capacité d'accueil de tels équipements sur son pont. La portance de ces ailes est maximisée grâce à leur rotation permettant d'avoir l'angle le plus optimal des ailes. Ces ailes peuvent être aussi utilisées pour freiner évitant d'utiliser le moteur arrière⁴⁸. Ces modèles posent des difficultés de rétractabilité, or, cette manœuvre est nécessaire pour assurer la bonne navigabilité du navire. Certains projets prévoient des ailes rétractables,



Navire *Canopée*
Crédit photo :Zephyretboree.com

⁴⁷ *Ibid*, p.22, Lloyds Register, « *Rules for sail assisted ships* », p.11 listant de nombreuses entreprises développant cette technologie.

⁴⁸ *Idem*, p. 10



Rétractabilité des ailes du navire *Canopée*

Crédit Photo : Youtube.com

notamment le navire *Canopée* destiné à transporter les pièces de la fusée Ariane 6. A défaut de rétractabilité, une maintenance plus importante de ces équipements est certainement nécessaire.

Initialement installés sur des voiliers de régates (notamment le premier lors de l'America's Cup en 1988), de nombreuses entreprises développent de nouveaux concepts afin d'appliquer la technologie des ailes rigides à des navires de commerce ou des navires de passagers. Malgré de nombreux projets et plusieurs tests, il n'existe pas encore de navire utilisant des ailes rigides totalement opérationnels, ceux-ci seront mis à l'eau dans les prochaines années, à l'instar du *Canopée*.

PARTIE 1 : LA PROPULSION VELIQUE : UNE OPPORTUNITE ECONOMIQUE POUR LE COMMERCE MARITIME

Face au contexte réglementaire actuel, la propulsion vélique présente d'indiscutables qualités pouvant être bénéfiques au commerce maritime (Titre 1), cependant, son développement est rendu difficile par diverses barrières (Titre 2).

Titre 1 : Le potentiel important du développement de la propulsion vélique

La propulsion vélique peut paraître utopique et rencontre de nombreuses difficultés de développement pourtant elle se présente comme une solution sérieuse pour rendre le transport maritime plus écologique rapidement et efficacement. De nombreuses grandes compagnies maritimes ont ainsi montré leur intérêt pour ce moyen de propulsion à l'instar de la CMA CGM avec le projet *Beyond the Sea*, Louis Dreyfus Armateurs avec le projet *Airseas*, MSC avec *Silenseas* ou encore l'installation par Maersk de deux rotors Flettner sur un de ses navires en 2018. La propulsion vélique apparaît donc de plus en plus comme une opportunité mais son développement est lent, on estime que son essor ne commencera qu'à partir de 2030-2040⁴⁹. Il s'agira donc d'étudier l'opportunité que représente la propulsion vélique pour le commerce maritime (Chapitre 1) mais également les barrières auxquelles elle se trouve confrontée limitant son essor (Chapitre 2).

⁴⁹ C. VALERO, *Une énergie économique et écologique : la force du vent*, Note de synthèse ISEMAR, n°210, Mai 2019, p.4

Chapitre 1 : L'évident potentiel de la propulsion vélique

Section 1 : Un potentiel environnemental

Les nouvelles techniques de propulsion vélique sont, pour la plupart des techniques, déjà développées et étudiées au XX^e siècle, le contexte environnemental actuel leur donne cependant un regain d'intérêt. Allant à l'encontre de notre conception actuelle, les auteurs s'intéressant à la propulsion vélique dans les années 1980 considéraient que le réchauffement climatique pouvait mettre à mal le développement de la propulsion vélique⁵⁰. Aujourd'hui, le réchauffement climatique est, au contraire, perçu comme un moteur pour développer plus de projets de propulsion vélique en raison de la faible consommation en CO2 des navires véliques. Ces auteurs, face au peu de recherches encore disponibles sur le sujet dans les années 1980, envisageaient le réchauffement climatique comme un phénomène rendant le voyage maritime encore plus difficile voire impossible pour des navires à propulsion vélique. L'idée était alors que les externalités négatives de l'augmentation des émissions à effet de serre dans l'atmosphère entraînent des modifications des courants et ultimement la force du vent créant même parfois des événements météorologiques (tempêtes etc..) rendant hostile le voyage maritime. Même si le rapport entre la propulsion vélique et le réchauffement climatique n'est plus envisagé de cette façon, l'argument n'est toutefois pas à écarter *prima facie*. Le réchauffement climatique a bien un impact sur les voyages maritimes, que ce soit pour l'exploitation de navires à propulsion vélique ou de navires conventionnels, modifiant les routes maritimes, rendant certaines zones plus à risque par une météo moins favorable aux navires⁵¹. Toutefois, la situation est moins alarmiste par rapport à ce que les auteurs de 1985 présentaient. Les difficultés météorologiques peuvent s'anticiper par le routage maritime qui s'est grandement développé depuis les années 1980, la route

⁵⁰ L. BERGESON, C. KENT GREENWALD, Sail Assist Developments 1979-1985, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, n°19, 1985, p.103

⁵¹ G. MANNARINI, « *The twofold aspect of climate change on navigation: the search for new maritime routes and the challenge of reducing the carbon footprint of ships* », Rapport technique du Centre Euro-Méditerranéen sur le changement climatique, n° RP0252, Mars 2015

empruntée sera donc adaptée selon les événements météorologiques en cours. Le réchauffement climatique n'apparaît plus aujourd'hui comme un obstacle au développement de la propulsion vélique même s'il est indéniable que le commerce maritime doit s'adapter à des changements liés à ce réchauffement. Ainsi aujourd'hui, la propulsion vélique a un rôle dans la recherche de solution aux changements climatiques. Eric FOULQUIER, Professeur de géographie à l'Université de Bretagne Occidentale, présente ainsi la propulsion vélique comme une solution radicale mais « *la plus efficace en termes de réduction drastique des émissions de polluants* »⁵². L'avantage principal de la propulsion vélique est qu'elle ne rejette pas en elle-même de gaz à effet de serre, la rendant ainsi particulièrement efficace et neutre. La propulsion vélique va représenter des gains à la fois en termes d'émissions de gaz polluants et en termes d'argent grâce aux économies réalisées sur le fioul.

Toutefois donner des chiffres sur les gains obtenus par la propulsion vélique par rapport à un navire conventionnel est difficile. D'une part, son utilisation ne se fait pas sur toute la durée du voyage maritime, le routage météorologique va, certes, chercher la route optimale pour améliorer les performances mais les équipements véliques ne sont utilisés généralement qu'en assistance à la propulsion classique⁵³ lorsque les vents sont propices. D'un voyage à un autre sur une même route, les performances peuvent donc grandement varier selon les circonstances notamment météorologiques. D'autre part, en l'absence de réelle exploitation de ces navires et face à la diversité d'équipements véliques, les performances en termes de réduction des émissions de gaz à effet de serre ne peuvent être encore que des estimations. De plus, la réduction des émissions de CO2 ne peut pas se déduire des estimations en réduction de fioul en ce que le lien entre les deux n'est pas linéaire puisque le lien entre la consommation d'énergie et la consommation de fioul ne l'est pas non plus⁵⁴. La charge du moteur a ici un rôle important puisque la consommation de fioul augmente, en effet, à mesure que la charge du moteur diminue. De plus, selon la charge du moteur, la composition des émissions

⁵² E. FOULQUIER, Transport maritime et changements climatiques, *DMF*, n°815, Juillet 2019, p. 581-589

⁵³ A l'exception de certains projets ayant fait le choix d'une propulsion vélique principale, comme Neoline par exemple.

⁵⁴ F. BALLINI, D. NEUMANN, J. BRANDT, A. AULINGER, A. OLCER, M. VOLKER, « *Sail into a Sustainable Future: Air pollution, health and economic assessment report* », NRS Sail, Novembre 2015, p.8

rejetées ne sera pas la même puisque celle-ci dépend de la température de combustion des éléments et de la disponibilité d'oxygène⁵⁵.

Plusieurs études sur différents types de navires véliques et sur différentes routes ont été menées pour chiffrer les gains espérés par la propulsion vélique. Aucun chiffre ne fait aujourd'hui consensus sur les réductions d'émission de cette propulsion par manque d'expérimentation de véritables navires véliques pour établir les gains en énergie obtenus. Ainsi, F. BALLINI et A. parlent de 35% de réduction des émissions de CO², CE Delft prévoit par des calculs des réductions entre 2 et 24% selon le type de navire et de propulsion vélique⁵⁶ ou encore entre 10 et 35% pour la société Skysails⁵⁷.

Section 2 : Un potentiel économique

Gain économique – Le gain majeur de la propulsion vélique est économique, l'utilisation de la propulsion vélique permet en effet d'alléger la propulsion principale en la remplaçant lorsque les vents sont propices. La propulsion vélique est ainsi attractive pour les armateurs puisqu'une fois installée et les investissements de départ amortis, elle permet d'économiser en fioul. Les économies en carburant réalisées ont fait l'objet de diverses études, l'exploitation de navire vélique n'étant pas encore suffisante pour avoir des chiffres fiables basés sur l'expérience, les données actuelles ne sont que des estimations ou des tests à petite échelle. Ces estimations sont particulièrement variables, ne permettant pas d'obtenir de résultats fiables. Ainsi, pour les kites les économies de carburant sont estimées parfois à « 1-32% »⁵⁸, « *jusque*

⁵⁵ F. BALLINI, D. NEUMANN, J. BRANDT, A. AULINGER, A. OLCER, M. VOLKER, « *Sail into a Sustainable Future: Air pollution, health and economic assessment report* », NRS Sail, Novembre 2015, p.8

⁵⁶ CE DELFT, « *Study on the analysis of market potentials and market barriers for wind propulsion technologies for ships* », Novembre 2016, p.51

⁵⁷ SKYSAILS, « *New Energy For Shipping: Press Kit* », Janvier 2011, p. 5

⁵⁸ A. LARKIN, M. TRAUT, C. WALSH, A. FILIPPONE, Propulsive power contribution of a kite and a Flettner rotor on selected shipping routes, *Applied Energy*, Janvier 2014, p. 371

50% »⁵⁹, « 10-35% »⁶⁰ ou encore « 5% en moyenne et entre 10 et 12% dans de bonnes conditions » selon les tests réels réalisés par la société Skysails sur leur navire vélique équipé d'un kite *MS Beluga Skysails*⁶¹. Pour les rotors Flettner, les économies sont estimées à « 25% »⁶², « 2-24% »⁶³, « 10-35% »⁶⁴ ou encore « 10% »⁶⁵. Quant aux ailes et voiles, il est estimé qu'elles peuvent économiser selon l'OMI 5% pour un navire naviguant à 5 nœuds et « jusqu'à 20% pour un navire naviguant à 10 nœuds »⁶⁶, la société Neoline avec ses navires à propulsion vélique principale a pour objectif des économies de carburant de 80-90%⁶⁷, on trouve également comme estimations « 10-40% »⁶⁸ ou « 20,5-17% »⁶⁹, « 18% pour un grand vraquier (90 000DWT), 9% pour un tanker de 90 000DWT »⁷⁰ ou même 8.3%⁷¹.

Les gains espérés pour les armateurs vont dépendre de divers facteurs opérationnels comme la route empruntée, la taille et le type du navire, sa vitesse ou encore les caractéristiques de l'équipement vélique lui-même. Ainsi, par exemple, les gains en fioul sont plus importants pour un kite lorsqu'il est installé sur un petit navire par rapport

⁵⁹ P. NAAIJEN, V. KOSTER, « Performance of auxiliary wind propulsion for merchant ships using a kite. », Proceedings of the 2nd International Conference on Marine Research and Transportation, p. 45-53, Naples, Italie, 28-30 Juin 2007, p. 52, pour un Tanker de 50 000 DWT utilisant un kite de 500 m² avec une ligne de 350m avec des vents de force 7 sur l'échelle de Beaufort

⁶⁰ Lloyds Register, « Wind-power shipping: a review of the commercial, regulatory and technical factors affecting uptake of wind assisted propulsion », Février 2015, p.11

⁶¹ R. LU, J.W. RINGSBERG, p.6, *Op Cit.* p.23

⁶² ENERCON GmbH, 'Rotor sail ship *E-Ship 1* saves up to 25% fioul', Enercon Press release, 29 Juillet 2013

⁶³ A. LARKIN, M. TRAUT, C. WALSH, A.FILIPPONE, p. 371, *Op Cit.* p. 29

⁶⁴ Lloyds Register, « Wind-power shipping: a review of the commercial, regulatory and technical factors affecting uptake of wind assisted propulsion », Février 2015, p.11

⁶⁵ G. CLODIC, A. BABARIT, J.C. GILLOTEAUX, « Wind propulsion options for energy ships », Proceedings of the 1st International Offshore Wind Technical Conference, San Fransisco, Californie, Etats-Unis, 4-7 Novembre 2018, p.5, pour un navire équipé d'un rotor de 5m de diameter et 30m de hauteur naviguant à 15 noeuds.

⁶⁶ OMI, Seconde étude sur les gaz à effet de serre, 2009, p. 49

⁶⁷ Annexe 1 : Entretien avec Michel Péry, Neoline, 15 juillet 2020

⁶⁸ Lloyds Register, « Wind-power shipping: a review of the commercial, regulatory and technical factors affecting uptake of wind assisted propulsion », Février 2015, p.11

⁶⁹ *Ibid* R. LU, J.W. RINGSBERG, p.5

⁷⁰ CE DELFT, « Study on the analysis of market potentials and market barriers for wind propulsion technologies for ships », Novembre 2016, p.51

⁷¹ P. C. SHUKLA AND K. GHOSH, Revival of the Modern Wing Sails for the Propulsion of Commercial Ships, *Engineering and Technology International Journal of Physical and Mathematical Sciences*, 2009, Vol.3, N°3, p.207-212

à un navire plus grand⁷². Ce sont donc tous ces facteurs qui rendent difficilement quantifiables les gains en termes économiques de la propulsion vélique.

Un développement dépendant de l'économie – Les gains réalisés par les réductions de consommation de carburant dépendent également du coût du baril de pétrole. Les fluctuations du prix du carburant rendent difficiles les estimations des gains en dollars des armateurs qui choisissent la propulsion vélique⁷³. Certaines études sur la propulsion vélique supposent un coût du baril de pétrole ne cessant d'augmenter créant une pression économique sur les armateurs pour rechercher des solutions moins coûteuses et plus durables⁷⁴. Cependant, ce modèle est actuellement faux, le prix du baril est aujourd'hui particulièrement bas. Le prix du baril de pétrole a atteint 99 dollars en 2014 mais s'est effondré en 2015 et peine depuis à remonter. La barre des 30 dollars fut même dépassée à la suite de la crise du Covid-19 en mars 2020. Il est, aujourd'hui, en juin 2020 à 40,27 dollars⁷⁵ seulement. Ces prix très bas n'incitent donc pas les armateurs à investir dans des propulsions innovantes indépendantes du pétrole.

Instaurer un marché des droits à polluer dans le secteur maritime pourrait également permettre à la propulsion vélique de connaître un essor⁷⁶ en exerçant une pression sur le prix de l'exploitation du navire. En effet, par ce système, les émissions de CO2 seraient alors limitées à un quota et le prix de l'exploitation du navire utilisant du carburant émettant du CO2 au-delà de ces quotas augmentera nécessairement. L'Union européenne a instauré un marché des droits à polluer en son sein par la Directive 2003/87/CE⁷⁷ établissant un système d'échange de quotas d'émission de gaz à effet de serre dans l'Union européenne qui fait suite aux divers travaux sur le sujet au niveau des Nations Unies avec le Sommet de Rio en 1992 et la Déclaration cadre des Nations

⁷² *Ibid* p.17, CE DELFT, p.52

⁷³ *Idem* p.67

⁷⁴ R. KARSLÉN, G. PAPACHRISTOS N. REHMATULLA, « The diffusion of wind propulsion technologies in shipping: an agent-based model », 9th International Sustainability Transitions Conference, Manchester, Royaume-Uni, Mai 2018, p.21-22

⁷⁵ Chiffres Reuters et de la Direction Générale de l'Énergie et du Climat de la cotation du pétrole BRENT en juin 2020, Ministère de la transition écologique, 6 Juillet 2020, <https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/prix-des-produits-petroliers>, (Consulté le 24/07/2020)

⁷⁶ *Ibid.* R. KARSLÉN, G. PAPACHRISTOS N. REHMATULLA, p.22

⁷⁷ Directive 2003/87/CE du Parlement européen et du Conseil du 13 octobre 2003 établissant un système d'échange de quotas d'émission de gaz à effet de serre dans la Communauté et modifiant la directive 96/61/CE du Conseil, *JOUE* L275 du 25 Octobre 2003, p. 32-46

Unies sur les changements climatiques de 1992 qui impose de mettre en place des programmes nationaux de réduction des gaz à effet de serre (GES) et de transmettre des rapports périodiques aux Nations Unies. Cette Déclaration a donné lieu ensuite au Protocole de Kyoto de 1997 qui pose des plafonds pour les émissions de GES puis l'accord de Paris de 2015. L'objectif de la Directive est ainsi est de tarifier les émissions de carbone et d'accorder des droits à polluer aux entreprises consommatrices d'énergie dans les Etats membres de l'Union européenne. Les entreprises se voient délivrer des quotas d'émission fixant le niveau de GES qu'elles sont autorisées à émettre sur une certaine période. Les entreprises doivent ainsi demander des autorisations pour émettre des GES, elles bénéficient d'un « droit à polluer ». L'objectif de ce système est de favoriser la réduction des émissions de GES dans des conditions économiquement efficaces et performantes poussant les entreprises à investir dans des solutions plus vertes limitant les émissions. Cependant, cette Directive exclut de son champ d'application le secteur des transports dont le transport maritime. Les Compagnies maritimes ayant des navires sous pavillon des Etats membres de l'Union européenne ne font ainsi pas partie des entreprises concernées par ces quotas. L'idée de cette exclusion était de laisser ces secteurs s'organiser avec leurs propres systèmes d'échange de quotas d'émission à un niveau mondial au travers de leurs organisations internationales respectives. L'OACI (Organisation de l'aviation civile internationale) a ainsi adopté, pour le secteur aérien, une Résolution en octobre 2016 mettent en place le système « Corsia » (*Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation*) prévoyant la mise en place d'un mécanisme mondial de lutte contre les pollutions atmosphériques à partir de 2021 ayant la même logique du système d'échange de quotas d'émission pour le secteur aérien. Il n'existe pas de système équivalent au niveau de l'OMI. L'intégration du secteur maritime au système des quotas d'émission est donc fortement soutenue par le Parlement européen. La Directive 2018/410 du Parlement européen et du Conseil du 14 mars 2018 modifiant la Directive 2003/87/CE afin de renforcer le rapport coût-efficacité des réductions d'émissions et de favoriser les investissements à faible intensité de carbone et la décision (UE) 2015/1814⁷⁸ a été

⁷⁸ Directive (UE) 2018/410 du Parlement européen et du Conseil du 14 mars 2018 modifiant la directive 2003/87/CE afin de renforcer le rapport coût-efficacité des réductions d'émissions et de favoriser les investissements à faible intensité de carbone, et la décision (UE) 2015/1814, *JOUE* L76 du 19 Mars 2018, p.3-27

adoptée par le Parlement européen pour faire entrer le secteur maritime dans le système européen d'échange de quotas d'émission d'ici 2023, sauf si l'OMI met en place un mécanisme de réduction de quotas d'émission mondial d'ici cette date. Le système MRV⁷⁹ instauré en 2015 est la première pierre pour la création d'un futur système d'échange européen de quotas d'émission dans le secteur maritime. Également, le Pacte vert européen de 2019 réaffirme la volonté d'intégrer le secteur maritime au système européen d'échange de quotas d'émission. L'OMI a de son côté, bien adopté une politique recherchant à réduire les émissions sans pour autant instaurer un système d'échange de quotas d'émission. De plus, si les travaux de l'OMI sur le SOx et le NOx sont déjà bien développés, la réduction des émissions de CO2 est cependant moins régulée. La perspective de l'intégration du secteur maritime au système européen d'échange de quotas d'émission peut permettre aux nouvelles technologies vertes de connaître un essor et notamment la propulsion vélique. Dans le cadre d'un système d'échange de quotas d'émission, la propulsion vélique est un atout réduisant ses émissions et permettant ainsi de ne pas avoir à acheter sur le marché des droits à polluer des quotas supplémentaires si nécessaire. L'introduction de ce système pourra donc permettre d'augmenter le développement de moyens de propulsion comme la propulsion vélique.

Création d'emplois – Le développement de la propulsion vélique peut être source d'emplois. En raison de l'absence encore d'une maturité totale de cette technologie, il est impossible de donner une estimation se basant sur les sociétés existantes. Cependant l'organisation de recherche danoise CE DELFT a publié une estimation des gains d'emplois liés à la propulsion vélique en utilisant les données disponibles pour un secteur similaire, celui que l'équipement maritime⁸⁰. Il ressort de cette étude que la propulsion vélique peut espérer créer en se développant d'ici 2030 entre 6 500 et 8 000 emplois directs et 8 500 et 10 000 emplois indirects, en Europe. Ces emplois se retrouveront sur toute la chaîne de construction et opérationnelle : chantiers navals, entreprises productrices de technologie, entreprises d'optimisation du voyage maritime...etc. Toujours par analogie avec le secteur de l'équipement maritime, CE DELFT envisage la répartition des emplois dans les sociétés développant la propulsion

⁷⁹ *Ibid.* p. 16, Règlement (UE) n°2015/757

⁸⁰ *Ibid.* p. 17, CE Delft, p. 61

vélique. Pour les chantiers navals et producteurs de technologies, 35 et 40% seront alors ingénieurs ou techniciens supérieurs, 50 et 40% auront une formation professionnelle et 20% seront du personnel administratif. Au-delà de la création d'emplois, l'introduction de la propulsion vélique mène à une augmentation des compétences des équipages et des différents acteurs de la chaîne opérationnelle qui devront être formés à l'exploitation particulière d'un navire vélique. Cette étude de CE DELFT semble toutefois à relativiser, si effectivement la propulsion vélique va bien demander des emplois plus qualifiés, notamment d'ingénieurs, les chiffres de créations d'emplois et la comparaison avec le secteur de l'équipement marin semblent excessifs. En effet, même s'il y aura bien création de nouveaux emplois par le développement de ces projets, ce développement se faisant bien souvent dans les structures préexistantes (notamment des Compagnies Maritimes, des grands Chantiers navals etc...) la création d'emplois sera moindre que pour des structures *ex nihilo* comme peuvent l'être des projets comme Neoline, nouvel armateur, ou des sociétés d'ingénieurs développant des équipements véliques. Les structures comme les grandes Compagnies maritimes et chantiers navals vont sûrement embaucher davantage de personnel pour la réalisation d'un projet vélique mais en moindre mesure ayant déjà des services établis, ils n'auront donc pas à embaucher davantage de personnel administratif et pour ce qui est des Chantiers ayant déjà des équipes de techniciens et de personnes ayant réalisées une formation professionnelle, le seul besoin spécifique peut être celui d'ingénieurs ou de techniciens spécialisés. A contrario, le secteur de l'équipement maritime se développe davantage en dehors de ces structures préexistantes.

Chapitre 2 : Un potentiel à mettre en comparaison avec d'autres moyens de propulsion innovants

Plusieurs autres moyens de propulsion sont développés pour permettre de réduire les émissions. La propulsion vélique n'est ainsi pas celle favorisée actuellement malgré les avantages qu'elle peut offrir. Lors de son discours d'ouverture des Assises de l'Economie de la Mer 2019, le Président de la République Emmanuel Macron a évoqué les nouveaux moyens de propulsion sans mentionner pour autant la propulsion vélique, ne fut mentionné que le GNL.

Pour autant le GNL est une solution considérée comme temporaire qui n'a pour vocation que d'être utilisée pour une seule génération de navire avant de pouvoir développer la propulsion par hydrogène. Le GNL n'est ainsi qu'une propulsion de transition. La propulsion vélique peut également être considérée comme permettant de faire une transition vers un secteur décarbonisé et l'utilisation de combustibles décarbonisés. Les solutions envisagées actuellement sont suffisantes pour répondre aux objectifs fixés par l'OMI. Cependant, ils ne permettent pas d'entrer dans un secteur décarbonisé comme cela est souhaité. En effet, le GNL continue de rejeter des émissions polluantes même si cela est en moindre mesure que le fioul, il n'est donc pas neutre. De plus, certaines études remettent aujourd'hui en cause le réel gain en termes d'émission de CO₂ du GNL. Comme expliqué par M. Péry, le GNL bien qu'il « *supprime quasiment les SO_x et diminue énormément les NO_x* », le GNL a un pouvoir de gaz à effet de serre 20 à 25 fois supérieur à celui du CO₂ d'autant que « *sur toute la chaîne logistique, de l'extraction au consommateur final, il y a 3% de taux de fuite* ». Donc on a 20% de réduction des gaz à effet de serre par rapport au carburant classiques mais auxquels il faut rajouter 3% de fuite multiplié par 25, les gains sont ainsi moindres et relativisent l'intérêt du GNL. L'ONG européenne Transports et Environnement a également publié une étude montrant que le GNL était plus polluant qu'annoncé au travers d'essais sur la route⁸¹. Cette étude conclue que des camions au GNL rejettent de deux à cinq fois plus de NO_x que des camions au diesel et tout autant de particules fines. Il est également conclu que le GNL émet davantage, 26% plus, lors de sa production et de son transport que le diesel. Les gains du GNL sont donc à relativiser.

Une autre alternative pour atteindre les objectifs de l'OMI en ce qui concerne la réduction des émissions de soufre est l'installation d'épurateurs d'air (dits « *scrubbers* »). Cependant, ces équipements apparaissent également comme polluants pour l'environnement marin. En effet, les scrubbers utilisent de l'eau de mer pour traiter l'air, eau, qui est ensuite rejetée à la mer. Ce fonctionnement est, selon une étude suédoise, préjudiciable pour l'environnement marin en ce que l'eau rejetée est contaminée à forte dose de métaux lourds, d'hydrocarbures aromatiques et de particules

⁸¹ TRANSPORT ET ENVIRONNEMENT, « *Do gas trucks reduce emissions?* », Septembre 2019

de suie auxquels sont ensuite exposés les organismes marins⁸². Une utilisation à grande échelle des scrubbers pose ainsi un nouveau problème environnemental, cette solution ne peut donc également n'être que temporaire.

Même si un choix radical d'une propulsion vélique intégrale serait le plus efficace en termes de réduction des émissions⁸³, l'hydrogène et les bio fiouls sont favorisés comme solutions à long terme et durables. La perspective d'un changement de paradigme en faveur de l'hydrogène n'écarte pas pour autant la propulsion vélique. En effet, l'hydrogène pose une question de production. Pour maintenir une ligne de décarbonisation, la production d'hydrogène se doit de ne pas émettre d'émissions. Pour ce faire, la production d'hydrogène se fait par électrolyse de l'eau grâce à l'électricité. Des recherches portent ainsi sur comment rendre cette production moins coûteuse et avec de l'électricité « verte ». Un projet explore ainsi l'opportunité de la propulsion vélique dans cette production. Le projet FARWIND imagine ainsi un navire propulsé par le vent (équipé de rotor ou d'ailes) dont une turbine à eau créerait de l'électricité et une centrale de production installée sur le navire permettrait de produire de l'hydrogène qui serait ensuite ramené à terre puis vendu⁸⁴. Plus généralement, l'hybridation des navires est à envisager pour permettre de réaliser grâce à l'assistance vélique à la fois des gains d'énergie mais des gains économiques également. Ainsi, même si l'hydrogène s'annonce comme le changement majeur dans le futur, le vélique peut faire partie des moyens de propulsion du futur à long terme.

⁸² H. WINNES, M. GRANBERG, K. MAGNUSSON, M. MALMAEUS, A. MELLIN, H. STRIPPLE K. YARAMENKA, Y. ZHANG, « *Scrubbers: Closing the loop : Environmental analysis of marine exhaust gas scrubbers on two Stena Line ships* », Report IVL Swedish Environmental Research Institute, 2018

⁸³ *Ibid* p.28 E. FOULQUIER

⁸⁴ *Ibid*. p. 22, G. CLODIC, A. BABARIT, JC. GILLOTEAUX,

Titre 2 : Des barrières structurelles au développement de la propulsion vélique

Les nouvelles techniques de propulsion vélique existent depuis plusieurs années, mais leur développement est dépendant du contexte du commerce maritime. Dans les années 1970 et 1980, la propulsion vélique a pu se développer du fait de la crise économique des années 1970 mais a ensuite disparu face à l'amélioration de la situation économique. L'essor de la propulsion vélique actuel est corrélé avec la réglementation environnementale sur le commerce maritime, cependant, elle rencontre diverses barrières également rendant difficile son essor. Les barrières aux technologies innovantes sont de trois catégories⁸⁵ : comportementale (Chapitre 1, Section 1), organisationnelle (Chapitre 1, Section 2) et économique (Chapitre 2).

Chapitre 1 : Une émergence difficile de la propulsion vélique

Une innovation technologique est sujette à une maturation avant de pouvoir être développée sur un marché. Si certains optent pour des techniques traditionnelles de propulsion vélique à l'instar de TOWT ou encore de Neoline dont le projet n'est que l'assemblage de techniques préexistantes⁸⁶, la plupart des entreprises développant la propulsion vélique ont mis en oeuvre des techniques nouvelles. Ces technologies n'ont pour la plupart pas encore atteint une maturité technologique, la propulsion vélique est encore une technologie de niche à l'aube de la maturité technologie. Ainsi, l'essor de la propulsion vélique est rendu difficile par ce statut dont elle doit sortir dans les années futures pour pouvoir se développer sur le marché, mais cela doit passer par l'acceptation des acteurs du marché, ce qui n'est pas rendu facile en raison de diverses barrières. Il s'agira donc d'étudier les barrières à l'émergence de la propulsion vélique.

⁸⁵ S. SORRELL, E. O'MALLEY, J. SCHLEICH, S. SCOTT, « The economics of energy efficiency : Barriers to cost-effective investment », Edward Elgar Pub, Juillet 2003

⁸⁶ Annexe 1 : Entretien avec Michel Pery, Neoline, 15 Juillet 2020

Section 1 : Des difficultés liées aux risques de la propulsion vélique

Pour pouvoir émerger puis se développer la propulsion vélique en tant que technologie de niche se doit d'améliorer la perception des armateurs de cette technologie notamment au travers de l'information. Seulement par l'information et l'expérimentation celle-ci pourra atteindre une maturité technologique, gagner la confiance des armateurs pour développer davantage de projets.

Perception – Etudiant le développement des navires à propulsion vélique, I. ROJON et C. DIEPERINK ont conclu que la difficulté principale posée au développement de ces technologies était le manque de prise de conscience du rôle du commerce maritime dans le débat environnemental et du besoin d'investir dans des technologies plus durables et l'absence de mesures des gouvernements pour pousser à cette innovation⁸⁷. Cette idée va dans le sens de l'analyse du marché du commerce maritime comme une industrie conservatrice réticente aux évolutions telle que décrite par l'ancien PDG de la société de classification DNV GL, Henrik O. MADSEN, prônant un élan des compagnies maritimes vers plus d'initiatives pour améliorer les performances environnementales et la sécurité des navires⁸⁸. Cet article de ROJON et DIEPERINK, pourtant récent, apparaît cependant comme obsolète face aux réglementations nouvelles poussant les acteurs du commerce maritime à investir dans des innovations pour réduire l'impact environnemental de leurs activités. Malgré la prise de conscience du rôle du commerce maritime dans les changements climatiques des acteurs du commerce maritime aujourd'hui, notamment à la suite des diverses réglementations adoptées en ce sens, la propulsion vélique reste difficile à développer, les barrières sont également ailleurs. La barrière à l'adoption des armateurs est également psychologique, demandant des investissements importants dans une technologie encore peu répandue, le risque peut rebuter les acteurs du commerce maritime. Les risques visibles tel que celui de la propulsion vélique sont plus difficiles à prendre que des risques qui ne le sont pas, c'est

⁸⁷ I. ROJON, C. DIEPERINK, Blowin' in the wind? Drivers and barriers for the uptake of wind propulsion in international shipping, *Energy Policy*, Avril 2014, Vol. 67, p. 394-402

⁸⁸ L. VOGDRUP-SCHMIDT, « *The shipping industry is too conservative and passive* », Shippingwatch, 23 Juin 2015, <https://shippingwatch.com/Services/article7817989.ece>, (Consulté le 17/12/2019)

ce qui est ainsi développé par la Lloyds prenant l'exemple des armateurs capables de prendre des risques de marché quitte à posséder un surplus de navires par rapport à la demande, mais pour lesquels l'investissement dans des solutions nouvelles est difficile à mettre en œuvre⁸⁹. Pour pouvoir développer la propulsion vélique, il est donc nécessaire de réduire ces risques aux yeux des armateurs notamment au travers de l'information et d'essais.

Information imparfaite – Cependant, les acteurs du commerce maritime souhaitant développer la propulsion vélique sont confrontés à de l'incertitude. Cette incertitude représente un risque créant une barrière aux investissements dans ces technologies. La propulsion vélique a des difficultés à s'imposer auprès de ces acteurs par une méconnaissance des bénéfices que ces derniers peuvent tirer de ces technologies. Comme soulevé par R. LU et J.W. RINGSBERG, le manque d'information fiable sur les performances de la propulsion vélique est une barrière à son développement⁹⁰. Pour y remédier, la promotion de la propulsion vélique est importante. Plusieurs éléments se sont développés ces dernières années expliquant l'émergence de cette technologie et sa présence dans le débat sur le futur du commerce maritime et dans de nombreuses conférences récentes concernant le monde maritime⁹¹. Récemment, Neoline et TOWT ont rejoint l'association Armateurs de France, donnant une plus grande crédibilité à ces entreprises dans le secteur maritime⁹². L'association IWSA (International Windship Association), créée en 2014, participe à la promotion de la propulsion vélique, regroupant tous ses acteurs et participant à divers événements pour placer la propulsion vélique au cœur du débat sur la propulsion du futur du commerce maritime. L'IWSA a installé une antenne en France, à Nantes, face à la recrudescence de projets de propulsion vélique français afin d'affirmer la place de la France dans le développement de cette technologie⁹³. La recherche a ainsi également un rôle fondamental dans le

⁸⁹ *Ibid.* p. 22, Lloyds Register, p.21

⁹⁰ R. LU, J.W. RINGSBERG, *Op. Cit.* p. 23

⁹¹ En France cette année : V. BERNATETS, L. DETRIMONT, N. JOYEUX, Y. PARLIER, M. PERY, S. WARNEYS, « Kite, ailes, foils... les innovations nautiques irriguent le transport maritime », Assises de la Mer, Montpellier, France, 4 décembre 2019, N. JOYEUX, M. JOBIN, N. SDEZ, M. VAN PETEGHEM, « Propulsion vélique : des solutions qui arrivent à maturité », Euromaritime 2020, 4 Février 2020

⁹² TOWT en février 2020, Neoline en mai 2020, armateursdefrance.org

⁹³ N. JOYEUX, M. JOBIN, N. SDEZ, M. VAN PETEGHEM, « Propulsion vélique : des solutions qui arrivent à maturité », Euromaritime 2020, 4 Février 2020

développement de cette technologie. Les diverses études scientifiques menées permettent de donner des prévisions solides des performances de la propulsion vélique. Le Programme Interrégional de la Mer du Nord faisant partie du Fonds européen de développement régional de l'Union Européenne a ainsi financé à hauteur de 5,4 millions d'euros le *WASP Project*⁹⁴ rassemblant universitaires, développeurs de technologies de propulsion vélique et armateurs pour développer ensemble des solutions de navires à propulsion vélique en Mer du Nord afin de les développer ensuite sur le marché.

La propulsion vélique, étant encore à un stade d'immaturation technologique, représente un moyen de propulsion de niche au sens de S. MANDER où les innovations technologiques sont limitées à « *des projets, des tests en laboratoires ou des marchés spécifiques* »⁹⁵. Pour émerger, ces innovations doivent se confronter aux technologies déjà établies sur le marché, c'est le cas de la propulsion vélique avec le fioul, propulsion dominante, ou encore avec les nouvelles technologies à un stade de développement plus avancé comme le GNL.

Selon F.W. GEEL, l'expérimentation et les tests des projets sont des éléments permettant d'engendrer un intérêt des acteurs du milieu et le développement de la technologie⁹⁶. Pour que les armateurs deviennent des « *niche supporters* »⁹⁷, le rôle des fournisseurs de technologies, donc les entreprises développant des équipements véliques, est important pour fournir des gages aux armateurs sur les performances de la propulsion vélique. Chaque nouveau test va permettre d'améliorer les connaissances globales sur la propulsion vélique et développer cette technologie davantage. La théorie n'est ainsi pas suffisante pour les acteurs du commerce maritime, d'autant que les prédictions sont variables puisque les performances du navire vont dépendre des vents qui changent sur une route d'une période à l'autre⁹⁸. Les différents tests sont donc primordiaux pour permettre à la propulsion vélique d'émerger à une échelle plus importante. Cependant,

⁹⁴ D. VAN HEUSDEN – VAN WINDEN, « *EU-backed Wind-Assist Ship Propulsion Project Sets Sail on its Three-Year Voyage* », Northsearegion.eu, 4 Novembre 2019, <https://northsearegion.eu/wasp/news/eu-backed-wind-assist-ship-propulsion-project-sets-sail-on-its-three-year-voyage/> (Consulté le 10/06/2020)

⁹⁵ S. MANDER, Slow steaming and a new dawn for wind propulsion : A multi level analysis of two carbon shipping transitions, *Marine Policy*, n°75, 2017, p. 212

⁹⁶ F.W. GEEL, A socio-technical analysis of low-carbon transitions: introducing the multi-level perspective into transport studies, *Journal of Transport Geography*, n°24, Septembre 2012, p. 471-482

Ibid. p. 31, R. KARSLÉN, G. PAPACHRISTOS N. REHMATULLA, p.9

⁹⁷ *Idem* R. KARSLÉN, G. PAPACHRISTOS N. REHMATULLA, p. 9

⁹⁸ *Ibid.* p. 17, CE Delft, p. 67

les tests de propulsion vélique avec de véritables navires réalisés jusque lors ne sont que sur de très petites échelles et bien souvent ne portent pas sur les nouvelles technologies de propulsion vélique mais sur des navires de commerce possédant une voile traditionnelle⁹⁹.

En effet, deux modèles de développement des navires véliques existent, ceux se basant sur des innovations technologiques telles que présentées préalablement et ceux basés sur la voile traditionnelle et dont l'activité joue sur la dimension écologique et traditionnel de ce mode de transport. Ces derniers se retrouvent beaucoup dans les projets de propulsion principale vélique, c'est le cas notamment des navires des sociétés Grain de Sail et TOWT. Ces modèles se concentrent sur des marchés régionaux voire locaux et n'ont rien de comparable aux Compagnies maritimes déjà installées dans le commerce maritime¹⁰⁰. Bien que ces modèles soient les plus aboutis ils ne permettent pas réellement de subvenir au besoin d'information des acteurs maritimes en raison de leur échelle réduite. Ainsi, la propulsion vélique ne se retrouve aujourd'hui réalisée que sur de petits marchés ne permettant pas de donner des gages suffisants de performance aux armateurs. Les Chantiers de l'Atlantique ont également réalisé des tests sur une version réduite d'un navire de leur voile innovante Silenseas¹⁰¹, mais ces tests à petite échelle ne sont pas encore suffisants pour prouver les capacités de la propulsion vélique aux armateurs.

S. MANDER souligne également l'importance des premiers exemples, au-delà des essais, pour pousser une technologie à se développer. Pour cela, elle favorise l'adoption de cette technologie sur un marché qui lui est favorable (importance pour ce marché du facteur écologique, vents propices sur la route empruntée...) afin de prouver les performances de la propulsion vélique et récolter des données. Cette preuve est en matière d'innovations maritimes souvent apportée par la mise en place de la technologie dans un autre secteur de l'économie, c'est le cas par exemple de l'utilisation de batterie comme propulsion utilisée sur certains ferrys qui a d'abord été développée dans le secteur automobile. Mais la propulsion vélique ne possède pas d'autres secteurs sur lequel elle pourrait se développer et faire ses preuves avant d'être appliquée au secteur

⁹⁹ Navires de Grain de Sail ou encore de TOWT

¹⁰⁰ S. MANDER, p.21, *Op. Cit.* p. 40

¹⁰¹ 20 minutes, « *Saint-Nazaire: Les Chantiers de l'Atlantique testent une voile innovante pour les... paquebots* », 20minutes.fr, 20 Décembre 2020, <https://www.20minutes.fr/planete/2679459-20191220-saint-nazaire-chantiers-atlantique-testent-voile-innovante-paquebots> (Consulté le 25/07/2020)

maritime. Ce point de développement évoqué par S. MANDER semble toutefois commencer à être atteint pour la propulsion vélique notamment avec le projet du navire *Canopée* transportant la future fusée Ariane 6 ou avec les tests réalisés par le projet *Beyond the sea* de la CMA CGM et du navigateur Yves PARLIER pour tester la propulsion par kite¹⁰². Sur ce marché spécifique empruntant une route favorable, la route des Alizés pour le *Canopée*, la propulsion vélique peut montrer par une démonstration à grande échelle ses avantages et ses éventuels inconvénients permettant aux différents acteurs du milieu maritime de l'envisager comme une propulsion potentielle, économique et écologique. Le rôle de ces « *first movers* »¹⁰³ est donc primordial. Les projets en développement actuellement, qui devraient être exploités dans la décennie à venir, vont donc tenir ce rôle de « *first movers* » déterminants pour le futur de la propulsion vélique.

¹⁰² B. BEZIAT, « Bassin d'Arcachon : le kite d'Yves Parlier va prendre son envol », Sud Ouest, 14 février 2019, <https://www.sudouest.fr/2019/02/14/le-kite-de-parlier-va-prendre-son-envol-5820050-2918.php> (Consulté le 17/06/2020)

¹⁰³ *Ibid.* p. 17, CE DELFT, p.76

Section 2 : Des difficultés inhérentes à la propulsion vélique

Limitation de la taille des navires – Toutes les méthodes de propulsion vélique ne peuvent évidemment pas être développées sur tout type de navires. Toutes les Compagnies maritimes ne peuvent donc pas se tourner vers le vélique facilement. Les ailes et rotors sont ainsi plus adaptés à des vraquiers ou tout navire à pont plat, c'est pourquoi des Compagnies maritimes exploitant des porte-conteneurs, comme la CMA CGM, s'orientent davantage vers les kites que ces autres méthodes pour adopter le vélique. Les kites sont en effet, pour leur part, plus adaptés à des navires comme les porte-conteneurs ne laissant pas de grand espace sur leurs ponts. Les gréements à voile ne peuvent pas se positionner à l'infini sur le pont du navire, ils sont limités par la taille du navire puisque « *la distance à l'avancement augmente au cube alors que la capacité de mettre des voiles augmente au carré c'est-à-dire sur la surface de pont* »¹⁰⁴. De plus, ces équipements ne doivent pas poser de difficultés à la manutention, or pour des porte-conteneurs chargés et déchargés par des portiques, la présence de gréements de taille imposante au milieu du navire pose des difficultés opérationnelles résultant nécessairement sur une perte de temps lors des opérations. Cependant, la place à quai dans un port coûte à l'armateur du navire en droits de port, la manutention doit donc se réaliser dans les plus brefs délais. Ainsi, la propulsion vélique ne peut pas s'adapter à tout type de navire, la taille du navire et sa manutention sont des facteurs déterminants dans l'adoption de la propulsion vélique.

Limitation de la vitesse du navire – La propulsion vélique a un impact sur la vitesse du navire. Le commerce maritime s'est orienté depuis la crise de 2008 vers le « *slow steaming* » permettant d'économiser sur le carburant dépensé par le navire. Cette pratique est devenue une norme notamment pour les portes conteneurs pouvant naviguer à des vitesses plus importantes que d'autres navires comme des vraquiers ou des rouliers. Un navire est considéré en « *slow steaming* » lorsque sa vitesse du navire ne dépasse pas 18 nœuds¹⁰⁵. Or, cette situation augmente la durée du voyage maritime du navire, la

¹⁰⁴ Annexe 1 : Entretien avec Michel Pery, Neoline, 15 Juillet 2020

¹⁰⁵ Maersk, Glossary of terms, Octobre 2014, https://web.archive.org/web/20141031150023/http://files.shareholder.com/downloads/ABEA-3GG91Y/2428187051x0x577328/e3c9f031-6baa-4f11-ac1e-5e58c20bf35e/Definitions_UK.pdf, (Consulté le 26/07/2020)

réduction de la vitesse de 27 à 18 nœuds augmente ainsi la durée d'un voyage entre l'Europe et l'Asie de 7 jours¹⁰⁶. Cette pratique est donc largement employée dans le commerce maritime, notamment pour des raisons économiques malgré les conséquences négatives que ces délais peuvent avoir sur la chaîne logistique des chargeurs. La propulsion vélique requiert d'autant plus une vitesse moindre du fait qu'une vitesse élevée du navire rend la propulsion vélique moins efficace¹⁰⁷. La propulsion vélique augmente donc la durée du voyage maritime par rapport à un navire utilisant une propulsion classique. Ainsi, le développement du kite pour les portes conteneurs trouve ici une de ses limites, le kite est le moyen de propulsion vélique le plus sensible à la vitesse et qui requière une vitesse faible du navire¹⁰⁸. Or, les portes conteneurs sont des navires de commerce naviguant à une vitesse importante par rapport aux autres, il y a donc une incompatibilité entre les deux. Les armateurs choisissant la propulsion vélique doivent pouvoir s'assurer que les chargeurs sont prêts à faire des sacrifices sur la durée du voyage maritime. Selon Marc VAN PETEGHEM, la question de la vitesse crée un paradoxe, puisque la propulsion vélique a besoin de réduire sa vitesse mais d'un autre côté à la vitesse à laquelle le navire navigue le navire aurait peu consommé de carburant puisqu'il consomme plus à des plus grandes vitesses¹⁰⁹. Michel PERY, Président de l'entreprise armatrice Neoline souligne ainsi cette question de l'acceptation des ajustements nécessaires sur la vitesse moyenne du navire par les chargeurs comme une des difficultés de la propulsion vélique¹¹⁰.

Pluralité de modèles économiques – Plusieurs modèles permettent de développer un projet de propulsion vélique. L'échelle de ces modèles n'est pour le moment pas comparable à l'échelle du commerce maritime. Les plus aboutis actuellement sont des modèles à petite échelle se focalisant sur des marchés spécifiques pour se développer et éventuellement faire grandir leur marché au fur et à mesure. C'est le modèle retenu par des projets comme Grain de Sail ou TOWT qui viennent se positionner sur des marchés particuliers de marchandises à forte valeur ajoutée : le chocolat, le rhum ou le café bio...etc qu'ils vendent eux-mêmes sur une boutique en ligne. Leur modèle utilise alors

¹⁰⁶ S. MANDER, p. 213, *Op. Cit.* p. 40

¹⁰⁷ *Ibid.* p.20, E&E CONSULTANT, p. 10

¹⁰⁸ *Ibid.* p. 17, CE DELFT, p. 64

¹⁰⁹ Annexe 2 : Entretien avec Marc Van Peteghem, architecte naval, 27 juillet 2020

¹¹⁰ Annexe 1 : Entretien avec Michel Pery, Neoline, 15 juillet 2020

le moyen de propulsion comme un argument de vente en proposant un mode de consommation écologique et durable. La création d'un label par TOWT certifiant ses produits comme « transportés à la voile »¹¹¹ rentre dans la dimension marketing de ce choix de la propulsion vélique. Cependant, cela se fait au détriment du prix des produits qui augmentent en raison du prix de transport plus important par rapport à d'autres marchandises de même catégorie transportées en conteneurs. Ce modèle est éloigné de celui retenu aujourd'hui par le milieu du commerce maritime qui est progressivement devenu de plus en plus massifié, notamment grâce à l'essor des porte-conteneurs et leur gigantisme, permettant de réduire les coûts de fret et ainsi les prix des produits. C'est donc toute une nouvelle façon de consommation qui est proposée par ces entreprises, plutôt que seulement un nouveau moyen de propulsion, ce modèle reste donc marginal et n'a pas vocation à résoudre les difficultés environnementales du transport maritime qui doit s'envisager en termes de flux massifiés et à plus grande échelle.

La société Neoline adopte un modèle plus ambitieux s'orientant vers une charge plus importante de ses navires rouliers polyvalents, les Neoliners¹¹². Ces navires ont certes une capacité de chargement plus faible, 5 000 tonnes de port en lourd pour les premiers navires construits¹¹³, que des portes conteneurs ou vraquiers classiques. En effet, les vraquiers considérés comme les plus petits, les Handysize représentent entre 10 000 et 35 000 T, le navire polyvalent prévu par Neoline est donc bien en dessous des volumes du commerce maritime massifié actuel mais reste cependant dans la norme pour un petit roulier. Mais, l'arrivée de l'armateur Sogestran dans son capital a pour objectif de lui permettre de développer ses premiers projets de Neoliner et, à terme, augmenter les capacités de ses navires, la technologie gagnant de l'intérêt aux yeux des chargeurs au fil du temps et des preuves apportées de son efficacité¹¹⁴. L'objectif est donc de faire émerger la propulsion vélique et démontrer par l'expérience son efficacité par l'exploitation de véritables navires véliques, même petits, pour ensuite augmenter

¹¹¹ Towt.eu, Anemos Label

¹¹² Mise en service prévue en 2022 des deux premiers navires Neoliners

¹¹³ H. BIELAK, « *Les cargos à voile de Neoline veulent verdir le transport maritime* », Capital, 02 juillet 2019, <https://www.capital.fr/economie-politique/les-cargos-a-voile-de-neoline-veulent-verdir-le-transport-maritime-1343641>, (Consulté le 26/06/2020)

¹¹⁴ C. AUDIBERT, « *Neoliner : le premier cargo "vert"* », Paris Match, 09/06/2020, <https://www.parismatch.com/Actu/Environnement/Neoliner-le-premier-cargo-vert-1688688>, (Consulté le 25/06/2020)

l'échelle de cette exploitation. Neoline fait le choix non pas d'être un producteur de technologie et de vendre cette technologie à des compagnies maritimes préexistantes mais souhaite s'installer comme un armateur lui-même de référence dans la région nantaise et dans le marché du vélique, ce que la collaboration avec Sogestran et la Compagnie Maritime Nantaise a pour ambition de faire. Cependant, ce n'est pas le modèle pris par la plupart des entreprises développant la propulsion vélique. La propulsion vélique se développe davantage par une relation tripartite, et cette relation peut permettre une exploitation à grande échelle. Cette relation se fait entre les Compagnies maritimes déjà installés, des producteurs de technologies et un chantier naval apte à construire ce type de navire. De nombreuses entreprises développant la propulsion vélique sont donc des entreprises productrices de technologies composées d'ingénieurs à l'instar de Zéphyr et Borée. L'objectif est ainsi de trouver le soutien de Compagnies maritimes pour acheter leur technologie. Les Compagnies maritimes sont, elles, poussées vers la propulsion vélique et ces entreprises par les demandes environnementales des nouvelles réglementations, par l'opinion publique mais aussi les exigences de leurs clients comme ce fut le cas pour Jifmar et les exigences d'ArianeGroup comme vu précédemment. Ce modèle se retrouve ainsi dans divers projets comme celui de la société toulousaine Airseas, développant des kites, qui est en partenariat avec l'armateur Louis Dreyfus Armateur mais également avec l'armateur japonais Kawasaki Kisen Kaisha ou encore de la CMA CGM qui est partenaire du projet Beyond the seas également.

La propulsion vélique dans le commerce maritime est donc confrontée à des difficultés qui lui sont propres et qui limitent son adoption dans ce secteur. Toutefois, une fois la propulsion vélique émergée de la catégorie de technologie de niche, le secteur du commerce maritime exerce certaines barrières structurelles aux innovations rendant difficile également son développement.

Chapitre 2 : Un développement difficile des projets de propulsion vélique

Pour se développer, la propulsion vélique doit se confronter au marché du commerce maritime, la structure de celui-ci peut cependant lui être hostile et mettre à mal son développement. Pour les entreprises misant sur la propulsion vélique et une fois la maturité technologique atteinte, il faut également trouver des moyens de financement pour ces projets souvent coûteux, or, le secteur connaît d'importantes difficultés de financement des projets innovants.

Section 1 : Une recherche d'acteurs pour adopter la propulsion vélique

Le secteur du commerce maritime est un secteur déjà très organisé sur lequel la propulsion vélique peut avoir des difficultés à s'adapter en raison de diverses barrières structurelles.

Répartition des coûts - Un conflit majeur qui limite le développement de la propulsion vélique et plus généralement de nouvelles technologies dans le milieu du commerce maritime est celui de la répartition des coûts entre l'affréteur et le propriétaire du navire notamment dans le cadre de l'affrètement à temps. Le projet de propulsion vélique va être développé par le propriétaire, mais c'est généralement l'affréteur qui va bénéficier des retombées positives de cet investissement. Les chartes parties à temps prévoient généralement que les coûts relatifs aux soutes reviennent à l'affréteur à temps qui possède, en effet, la gestion commerciale du navire dont dépendent les soutes¹¹⁵. A titre d'exemple, la charte partie à temps type NYPE prévoit en sa clause 9(f) que le paiement du fioul du navire revient à l'affréteur et que celui-ci se doit de se conformer aux exigences réglementaires en termes d'émission de soufre. Le propriétaire dont le navire est destiné à l'affrètement n'est dès lors pas incité à investir dans des équipements écologiques et permettant d'économiser sur les soutes en ce qu'il n'est pas celui qui

¹¹⁵ CE DELFT, « *Study on the analysis of market potentials and market barriers for wind propulsion technologies for ships* », Novembre 2016, p.70

bénéficiera des retombées de tels investissements. De plus, l'affréteur n'a pas le rôle de porteur de projet concernant le développement des nouvelles technologies dans le commerce maritime. Ils ont un rôle puisqu'ils représentent la demande, mais ils ne peuvent pas être porteurs d'une niche comme peuvent l'être les propriétaires de navire pour faire émerger une technologie¹¹⁶. Or, l'affrètement à temps est un type de contrat très présent dans le commerce maritime, bien que sa place varie selon les secteurs. Pour le vrac liquide, 90% des navires sont affrétés au voyage alors que pour le vrac sec, secteur le plus propice à l'installation d'équipement vélique comme les voiles ou les Rotor Flettner, l'affrètement à temps concerne 60% des navires¹¹⁷. Pour pouvoir développer la propulsion vélique, la pratique contractuelle doit donc évoluer. Certains affréteurs investissent eux même pour installer sur le navire affrété des équipements véliques, mais pour ce faire, le contrat d'affrètement doit être long pour qu'ils obtiennent un retour sur investissement par les gains de carburant, c'est ce qu'a réalisé par exemple l'affréteur Cargill qui a installé un kite sur le vraquier qu'il affrétait. Cependant, tous secteurs confondus, la durée moyenne d'un affrètement à temps est de deux ans¹¹⁸, ce qui ne permet pas d'obtenir un retour sur investissement pour les affréteurs. Cette difficulté de la répartition des coûts peut être également dépassée si les taux de fret sont augmentés sur le navire vélique par rapport à un navire classique. Dans ce modèle, l'affréteur gagne en économies de carburant et le fréteur par l'augmentation du taux de fret permettant de transférer le gain en carburant de l'installation au propriétaire lui permettant d'obtenir un retour sur investissement. Cependant, selon une étude de 2014, pour un vraquier Panamax, seul 40% des gains en carburant par l'installation de nouvelles technologies sont transférés au propriétaire par le biais du taux de fret¹¹⁹. Une autre solution est également proposée par CE DELFT¹²⁰ s'inspirant du secteur de la construction, celle du financement par un tiers. Diverses solutions sont

¹¹⁶ *Ibid.* p. 31, R. KARSLEN, G. PAPACHRISTOS N. REHMATULLA, p.9

¹¹⁷ N. REHMATULLA, T. SMITH, Wind Technologies : Opportunities and barriers to a low carbon shipping industry, *Marine Policy*, n°75, Décembre 2015, p. 220

¹¹⁸ *Idem*

¹¹⁹ P. AGNOLUCCI, T. SMITH, N REHMATULLA, Energy efficiency and time charter rates : some evidence quantifying the extent of split incentive problem in Panamax drybulk market, *Energy Policy*, Vol. 84, Septembre 2015, p.48

¹²⁰ *Ibid.* p. 17, CE DELFT, p.83

Sur le financement par un tiers voir Section 2.

envisageables pour dépasser ce problème de répartition des coûts mais elles nécessiteront une révision des pratiques de l'affrètement.

Attractivité du navire – Également, ces équipements, par la méconnaissance des affréteurs et les difficultés opérationnelles qu'ils posent, peuvent rendre un navire moins attractif sur le marché de l'affrètement. Toutefois, il est relevé par l'étude réalisée par H. ROSS et O. SCHINAS que les navires équipés de technologies les rendant plus écologiquement responsables (que ce soit par la propulsion vélique ou autres), sont mieux valorisés sur le marché de l'affrètement que les navires conventionnels¹²¹ puisqu'ils permettent aux affréteurs de gagner en carburant. En dépassant les diverses autres barrières auxquelles elle est confrontée, la propulsion vélique peut faire partie de la réponse aux difficultés environnementales du commerce maritime et s'imposer comme une possibilité de propulsion sérieuse sur le marché. Mais, la méconnaissance de cette technologies et l'aversion aux risques peut poser problèmes aux affréteurs.

Cette question de l'attractivité du navire vélique se retrouve également sur le marché des navires d'occasion. En effet, la valeur du navire sur le marché de l'occasion a un rôle dans l'investissement des armateurs dans des navires innovants. Cette question a déjà été étudiée dans le cadre des navires aux GNL¹²². La propulsion vélique n'étant déjà pas favorisée sur le marché principal, elle ne gagne pas de valeur supplémentaire sur le marché de l'occasion. Ce marché est particulièrement sujet aux évolutions de l'économie maritime comme le démontrent O.SCHINAS et D.METZGER¹²³ laissant envisager une future valorisation des navires véliques dépendante de la situation économique et réglementaire, de leur popularité auprès des armateurs et de leurs performances.

Compatibilité avec les pratiques de l'affrètement - Certaines clauses des chartes parties peuvent également représenter un frein à la propulsion vélique, telle que la clause de consommation selon laquelle le propriétaire s'engage à ce que le navire respecte une

¹²¹ H. ROSS, O. SCHINAS, Empirical evidence of the interplay of energy performance and the value of ships, *Ocean Engineering*, vol. 190, 2019

¹²² J. FABER, D. NELISSEN, S. AHDOUR, J. HARMSSEN, S. TOMA, L. LEBESQUE, « *Study on the completion of an EU framework on LNG-fuelled ships and its relevant fuel provision infrastructure: Analysis of the LNG market development in the EU* », Commission Européenne, 2015, n° B-1049, p.122

¹²³ O. SCHINAS, D. METZGER, « Financing ships with wind – assisted propulsion technologies », The Royal Institution of Naval Architects Wind Propulsion Conference, Londres, Royaume-Uni, 15-16 Octobre 2019, p.180

certaines consommations de fioul et certaines performances. Pour reprendre l'exemple précédemment cité de la charte partie type NYPE, la clause 12 intitulée « *Speed and consumption*¹²⁴ » prévoit ce type de dispositions. Elle dispose, en effet, que le navire doit pendant toute la durée de la charte partie respecter des vitesses et des consommations journalières de fioul en condition de bonne météo telles qu'indiquées par le fréteur dans une annexe. Or, la propulsion vélique rend variable la performance du navire vis-à-vis des économies réalisées sur le fioul puisque tout dépend des vents favorables à l'utilisation des équipements véliques. Les affréteurs peuvent alors effectuer un recours contre le fréteur pour non-respect de cette clause de la charte partie si le navire consomme plus que ce qui est indiqué par le fréteur en raison de l'impossibilité d'utiliser sur une période donnée les équipements véliques notamment si les vents ne sont pas propices, cette clause pourra donc poser des difficultés aux fréteurs. La météo permet aux fréteurs de montrer une absence de manquements de sa part, le fréteur peut s'exonérer s'il démontre que la météo était mauvaise expliquant les mauvaises performances du navire¹²⁵. Or, dans le cadre de la propulsion vélique, la performance sera réduite non pas dans le cadre d'une mauvaise météo mais d'une météo non propice, c'est-à-dire ne présentant pas des vents permettant l'utilisation des équipements. L'interprétation du terme « *good weather* » est donc importante, notamment s'il faut la considérer à l'égard du navire auquel cas l'absence de vent constitue un mauvais temps pour le navire vélique ou au sens commun de mauvaise météo¹²⁶. Les parties utilisent des estimations pour remplir les documents de cette clause, pour indiquer le caractère approximatif de ces chiffres par le terme « *about* ». La jurisprudence a eu à déterminer l'étendue de ce terme concernant la consommation de fioul. La marge fixée en droit anglais¹²⁷ est de plus ou moins 5%¹²⁸. De même, la vitesse maximale du navire prévue par cette clause comprend selon la jurisprudence arbitrale de Londres une marge de plus ou moins 0,5%. Or, cette règle retenue par la Cour

¹²⁴ «Vitesse et consommation»

¹²⁵ J. MAKKAR, « *Speed and Consumption Warranties in Time Charterparties* », LinkedIn.com, 4 Novembre 2016, <https://www.linkedin.com/pulse/speed-consumption-warranties-time-charterparties-jagmeet-singh-makkar/> (Consulté le 11/06/2020)

¹²⁶ T. COGLIN, A. BAKER, J. KENNY, J. KIMBALL, « *Time Charters* », Informa Law from Routledge, 7e édition, 2014, p.83

¹²⁷ Droit généralement applicable aux chartes parties contenant des clauses déterminant la loi applicable et des clauses compromissoires.

¹²⁸ London Arbitration 12/85 - LMLN 158; London Arbitration 2/87 - LMLN 188

d'arbitrage international de Londres, ne s'applique que difficilement aux navires véliques qui vont avoir des vitesses variables selon les conditions météorologiques, le navire ne sera peut-être pas capable sur les voyages réalisés dans le cadre de la charte partie d'atteindre cette vitesse¹²⁹. Le droit anglais est plus souple sur le sujet considérant que cette appréciation des estimations doit se faire selon les caractéristiques du navire¹³⁰.

Beaucoup d'affrètement au voyage prévoient également des clauses interdisant les déviations sauf en cas de sauvetage de vie humaine ou pour récupérer un bien perdu en mer. Cette clause pose des difficultés en ce qu'elle empêche d'utiliser le plein potentiel de la propulsion vélique par l'adaptation de la route selon les vents favorables.

Ainsi, pour développer la propulsion vélique il sera ainsi nécessaire de réadapter les chartes parties.

Des engagements pour le moment non contraignants – La plupart des accords passés entre des compagnies maritimes et des producteurs de technologies véliques ou entre des armateurs de navires véliques et des chargeurs ne sont pas des accords contraignants mais bien souvent que des déclarations d'intérêt. Ainsi, la société armatrice Neoline a retenu le soutien de chargeurs sans que des contrats ne soient encore conclus. La recherche de chargeurs pour une société armatrice de navire vélique peut être tout autant difficile que la recherche d'armateurs pour des sociétés développant des technologies véliques en ce que les deux ont une aversion aux risques. En 2018, le groupe Renault a donc signé un partenariat de 3 ans avec Neoline mais Neoline a également reçu le soutien par des déclarations d'intérêts du constructeur de navires de plaisance Beneteau ou encore Manitou Group. Ces déclarations d'intérêts ont un intérêt en termes de promotion de la propulsion vélique et laissent envisager de futures collaborations une fois les navires construits mais il n'existe pas encore d'actes juridiques contraignants engageant ces chargeurs. De plus, les navires construits pour 2022 ne sont pas propices pour transporter la plupart des marchandises de grandes tailles de ces chargeurs (voitures, navires, engins de chantiers). MSC a également signé un mémorandum d'accord avec les chantiers de l'Atlantique pour la construction de deux navires de

¹²⁹ *Ibid.* p.17, CE DELFT, p.70

¹³⁰ Arab Maritime Petroleum Transport Co. V. Luxor Trading Corporation And Geogas Enterprise S.A. (The "AL BIDA"), 1987, Lloyd's Rep. 124 : the margin "*must be tailored to the ship's configuration, size, draft and trim etc.*" (*La marge doit être ajustée selon les caractéristiques du navire, sa taille, son tirant d'eau, son assiette etc...*)

croisière véliques équipés de voiles innovantes Silenseas, mais cet acte n'a aucune valeur contraignante. De plus, le mémorandum de MSC prévoit une clause de non-concurrence, empêchant les Chantiers de l'Atlantique de construire avant la livraison des navires de MSC (soit pas au moins avant 2028) de navires véliques de même catégorie, soit des navires de croisière¹³¹. Ainsi, pour le moment, même si ces accords sont de bon augure, ils restent sans valeur juridique. Il est toutefois à noter qu'il y a des projets d'envergures faisant l'objet d'actes contraignants, comme le projet du navire *Canopée* entre Ariane Group et la Compagnie maritime Jifmar, mais de tels projets restent une minorité.

Surcapacité de la flotte - Ce développement de la propulsion vélique est rendu d'autant plus difficile par la surcapacité actuelle de la flotte dans certains secteurs¹³², notamment des vraquiers qui sont les navires les plus à même d'installer des équipements véliques en raison du vaste espace de leur pont. En effet, dans les années 2000 de nombreux vraquiers ont été commandés par les Compagnies maritime mais la crise de 2008 a entraîné un ralentissement important de la demande laissant ce secteur en surcapacité de sa flotte¹³³. Les taux de fret des vraquiers sont ainsi faibles en raison de l'offre excédentaire par rapport à la demande. Les investissements sur ce secteur sont donc faibles en raison de ce taux de fret peu important. Ce faible taux de fret a été renforcé avec la crise du Covid-19 où ce marché s'est trouvé ralenti par les mesures mises en place dans la plupart des Etats, le Baltic Dry Index a chuté à partir de fin décembre 2019 jusque février 2020 pour atteindre le 11 février 2020 400 points, avant de remonter progressivement à partir de juin 2020¹³⁴. Cette situation est préjudiciable pour la propulsion vélique qui pouvait voir dans le vrac un secteur propice à son développement. Les projets de propulsion vélique se concentrent ainsi davantage sur des rouliers ou des navires spécifiques pour certaines marchandises, voire des porte-conteneurs pour ce qui concerne les kite. On retrouve toutefois des rotor Flettner sur des vraquiers mais de façon très marginale.

¹³¹ V. GROIZELEAU, « Paquebots à voiles: sauf MSC, Saint-Nazaire ne pourra rien vendre avant des années », Mer et Marine, 12 février 2020, <https://www.meretmarine.com/fr/content/paquebots-voiles-sauf-msc-saint-nazaire-ne-pourra-rien-vendre-avant-des-annees>, (Consulté le 27/06/2020)

¹³² *Ibid.* p. 17, CE DELFT, p.69

¹³³ Armateurs de France, Fiche « Le transport maritime de vrac sec », 2017

¹³⁴ Baltic Dry Index : <http://www.balticexchange.com/>

Section 2 : Une recherche de financement complexe

Le financement de nouvelles technologies maritimes est une des préoccupations majeures des acteurs de l'économie maritime comme l'ont montré les Assises de l'Economie de la Mer 2019 réunissant ces acteurs à Montpellier. A plusieurs reprises, les intervenants aux Assises de l'Economie de la Mer ont exprimé leurs craintes relatives au manque de financement des projets maritimes. Ce fut le cas dans le cadre de la table ronde dédiée à la propulsion maritime, mais ce fut également un thème récurrent des questions posées au Président de la République, Emmanuel MACRON, par des acteurs du monde maritime suite à son allocution d'ouverture de l'évènement¹³⁵. En effet, Yanis SOUAMI, président du SINAY, entreprise créée en 2008 développant une plateforme collectant des données afin de maximiser les performances du navire, a interrogé le Président sur le financement des nouvelles technologies maritimes. Il déplore ainsi l'absence de « licorne »¹³⁶ maritime malgré l'existence de véritables licornes en mer, les narvals, et évoque alors son souhait de « *faire émerger ce pléonasme des licornes maritimes* » par des investissements et la confiance des acteurs du public comme du privé dans ces nouvelles technologies et ces *start up*.

Le financement se présente ainsi comme l'une des barrières principales au développement de la propulsion vélique. Comme abordé précédemment, ces équipements représentent des investissements importants (plus d'un million d'euros pour l'installation d'un Rotor Flettner, par exemple¹³⁷) et les propriétaires de navire ne bénéficient pas nécessairement directement des avantages de cet investissement, le financement est donc rendu difficile.

Paramètres déterminants du financement - Selon O. SCHINAS et D. METZER le financement d'innovations de propulsion de navire dépend de plusieurs paramètres : l'existence d'une aide de l'Etat pour les armateurs choisissant une propulsion écologique, les dépenses opérationnelles, les dépenses en capital et les dépenses liées

¹³⁵ E. MACRON, R. SAADE, H. GUILLOU, C.SCHOELINCK, Y. SOUAMI, P. LOUIS-DREYFUS, F.GAILL, « *Entretiens de personnalités maritimes avec le président de la république* », Assises de la Mer, Montpellier, France, 3 décembre 2019

¹³⁶ Start up valorisée à plus de 1 milliard d'euros

¹³⁷ *Ibid.* p. 49, O. SCHINAS, D. METZGER, p.4

au voyage¹³⁸. Dans le cadre de la propulsion vélique, il n'existe pas d'aides de l'Etat pour les armateurs optant pour cette solution. Selon O. SCHINAS et D. METZGER, le choix des opérateurs est ainsi le résultat de biais les poussant à s'orienter vers ces technologies (pression de l'opinion publique à rendre le transport plus écologique, dans le cadre du projet Canopée l'impulsion venait d'ArianeGroup qui a demandé à Jifmar que le futur navire transportant la fusée Ariane 6 soit écologique, plusieurs solutions ont été envisagées et la propulsion vélique a été retenue¹³⁹...) plutôt que des incitations par des aides. Les coûts opérationnels restent les mêmes selon O. SCHINAS et D. METZGER d'un navire vélique ou d'un navire conventionnel, cette affirmation peut être à nuancer si les équipements nécessitent une manutention particulière ou des réparations plus coûteuses par exemple. En revanche, les dépenses en capital augmentent pour le navire vélique et sont supérieures au navire conventionnel en raison des investissements demandés par ces équipements. Mais, les dépenses du voyage sont diminuées puisque les équipements véliques vont permettre de réduire la consommation de carburant. Un équilibre est alors atteint par la compensation entre les dépenses supplémentaires en capital et les économies réalisées en dépenses du voyage. L'idéal serait même d'obtenir une équation où les économies du voyage seraient supérieures aux dépenses en capital. Le coût moyen du capital requis est donc un paramètre important et déterminant. Selon O. SCHINAS, il est nécessaire d'introduire un fret plus élevé pour ces navires véliques pour compenser pour les propriétaires le coût d'achat plus important et réussir à atteindre un équilibre entre les gains et les coûts de la propulsion vélique¹⁴⁰. Cependant, l'augmentation du fret rend le navire vélique moins compétitif sur le marché du transport maritime et de l'affrètement. Ainsi, le financement n'est envisageable que si la propulsion vélique correspond à cette équation, mais l'absence de démonstration et de données fiables sur les performances de la propulsion vélique ne permet pas encore de déterminer toutes les valeurs de cette équation, notamment les gains en carburant.

¹³⁸ *Ibid.* p. 49, O. SCHINAS, D. METZGER, p. 1

¹³⁹ T. ROMANACCE, « Un énorme navire à voile transportera la fusée Ariane 6 », Capital, 14 Octobre 2019, <https://www.capital.fr/entreprises-marches/un-enorme-navire-a-voile-transportera-la-fusee-ariane-6-1352713>, (Consulté le 20/06/2020)

¹⁴⁰ O. SCHINAS, « Chapitre 8: *Financing ships of innovative technology* », dans « Finance and risk management for international logistics and the supply chain », S.Gong, K. Cullinane, 2018, Pages 167-192, Page 172

De plus, le marché du commerce maritime est, comme développé précédemment, historiquement conservateur et réticent aux évolutions majeures. Ainsi les armateurs ont des difficultés à s'engager pour des solutions innovantes qui n'ont pas encore fait leurs preuves. Pour reprendre les termes de N.REHMATULLA, se trouve ici un véritable problème de « *l'œuf et de la poule* »¹⁴¹, sans Compagnie prenant le risque d'investir, la généralisation de la propulsion vélique ne peut se réaliser. Comme vu précédemment l'absence de démonstration est un des facteurs principaux des difficultés de développement de la propulsion vélique. Ce facteur entraîne les difficultés de financement, les armateurs et autres acteurs pouvant apporter des financements n'ayant pas une assez bonne visibilité des avantages qu'ils peuvent tirer de cette technologie¹⁴².

Plusieurs solutions de financement sont envisageables pour sortir de cercle vicieux rendant impossible une émergence de la propulsion vélique.

Solutions de financement – Crédit-export – Le crédit export est un crédit accordé à un projet par l'état ou une agence spécialisée de celui-ci (en France, la BPIFrance) pour soutenir l'économie nationale. Il est envisageable que les chantiers navals développant des navires véliques ou les entreprises créant des équipements véliques puissent bénéficier de ce type de crédit pour financer leurs projets. Le financement par les banques privées est rendu difficile par le risque représenté par l'investissement en une technologie n'ayant pas encore montré une maturité totale¹⁴³. Toutefois, les banques privées peuvent participer à ce financement également¹⁴⁴. Par un crédit-export, l'Etat soutient les exportateurs nationaux en fournissant une garantie aux banques qui financent le projet. Cette garantie permet aux banques d'avoir une plus grande confiance dans le projet et de prêter des fonds à des taux d'intérêt plus bas que les taux ordinaires¹⁴⁵. Le cout du capital est ainsi réduit pour l'armateur. La France peut avoir intérêt à accorder des crédit-export aux projets de propulsion vélique face au développement de cette technologie sur son territoire. En effet, de nombreux projets de propulsion vélique

¹⁴¹ N. REHMATULLA, T. SMITH, p. 224, *Op. Cit.* p.48

¹⁴² *Ibid.* p. 26, C. VALERO

¹⁴³ N. REHMATULLA, T. SMITH, p. 224, *Op. Cit.* p.48

¹⁴⁴ Annexe 1 : Entretien avec Michel Pery, Neoline, 15 Juillet 2020

¹⁴⁵ O. SCHINAS, Page 175, *Op. Cit.* p. 55

sont nés en France et de nombreuses entreprises françaises s'intéressent à cette technologie (Néoline, Jifmar, CMA CGM, Zephyr et Borée, VPLP, Airseas, TOWT, Grain de Sail...etc). Lors de l'Euromaritime 2020, il était ainsi évoqué le besoin pour la France de prendre conscience du potentiel de ces entreprises et de ne pas se laisser dépasser comme cela a pu être le cas dans le secteur de l'éolien¹⁴⁶.

Solutions de financement – Aide des banques publiques et de l'Etat- Certaines banques publiques permettent également ce financement. La banque allemande KfW propose par exemple des prêts à taux réduits pour les armateurs de navires sous pavillon allemand investissant dans des technologies écologiques¹⁴⁷. La Banque d'investissements européenne prévoit des prêts similaires sous condition notamment de pavillon.

Une participation financière peut également être demandée à des fonds dédiés aux innovations écologiques. Plusieurs fonds européens existent à ce sujet : Programme de recherche et d'innovation de l'Union européenne Horizon 2020 ou encore l'instrument financier pour l'environnement (Programme LIFE). Mais les conditions pour bénéficier de ces fonds sont exigeantes, le navire doit être sous pavillon européen et le projet doit avoir une forte valeur ajoutée européenne. Cette notion de « forte valeur ajoutée européenne » signifie que par l'action de l'Union européenne, il est possible d'atteindre des résultats que l'action de l'Etat membre seul n'aurait pas pu obtenir. Les procédures administratives sont également complexes et longues pour pouvoir obtenir une aide de ces fonds.

Un soutien peut également être apporté par l'Etat. La France a ainsi l'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'Energie (ADEME) qui a déjà participé au financement de certains projets de recherche et développement de propulsion vélique (Silenseas porté par les Chantiers de l'Atlantique et Seawing de Airseas). L'Etat a donc un rôle important. La fiscalité peut également permettre de pousser à l'investissement les armateurs¹⁴⁸. Le projet de loi de finance 2019 met en place un « *suramortissement*

¹⁴⁶ *Ibid.* p. 39, Euromaritime 2020

¹⁴⁷ *Ibid.* p. 17, CE DELFT, p.69

¹⁴⁸ *Ibid.* p. 26, C. VALERO

visant à inciter les armateurs à convertir leur flotte aux énergies propres », ce mécanisme est renforcé dans la loi de finance 2020¹⁴⁹.

Solutions de financement – Crédit-bail – La location avec option d’achat (LOA ou également crédit-bail) s’est développée ces dernières années pour l’achat d’un navire neuf, il peut permettre également l’achat d’un navire à propulsion vélique pour pallier les difficultés de financement¹⁵⁰. Par un crédit-bail, le locataire va pouvoir exploiter un navire contre le paiement d’un loyer à une banque ou un tiers qui a financé la construction du navire et en est propriétaire. La LOA va avoir une certaine durée au terme de laquelle le locataire va pouvoir acquérir le navire et en devenir propriétaire. Ce choix de mode de paiement pour un navire est souvent choisi par les chantiers navals puisque le risque est ainsi partagé entre le constructeur/vendeur et l’acheteur et peut être envisagé pour la propulsion vélique pour partager les risques.

Solutions de financement - Tiers financement – Le modèle du tiers financement est une méthode de financement développée par le secteur du bâtiment pour la rénovation écologique de bâtiments (panneaux solaires...etc). Par le tiers-financement, un tiers finance l’équipement d’un bâtiment de technologies écologiques contre le versement d’un loyer par l’entreprise bénéficiaire. Le montant de ce loyer est inférieur au montant des économies réalisées par l’équipement installé, ainsi le remboursement du locataire est compensé par les économies d’énergies. Ce mode de financement nécessite toutefois que les économies sur le carburant puissent être assez précisément quantifiées¹⁵¹. Ce modèle peut être envisagé pour la rénovation de navire et l’installation d’équipements à propulsion vélique sur des navires existants. Cependant en France, le tiers financement est réglementé par la loi AZUR de 2014 qui donne un champ d’application à ce mode de financement limité aux travaux de bâtiments, il n’est ainsi pas étendu aux travaux sur des navires (ceux-ci ne pouvant s’entendre comme des bâtiments étant des biens meubles au sens de l’article 531 du Code Civil). Pourtant, il y aurait intérêt à étendre le champ d’application du tiers financement aux navires souhaitant installer des

¹⁴⁹ Le Marin, « *Un peu de vert pour les navires dans le projet de loi de finances* », Le Marin, 17 Octobre 2019, <https://lemarin.ouest-france.fr/secteurs-activites/shipping/35182-un-peu-de-vert-pour-les-navires-dans-le-projet-de-loi-de-finances>, (Consulté le 20/06/2020)

¹⁵⁰ O. SCHINAS, p.178, *Op. Cit.* p.55

¹⁵¹ *Ibid.* p. 17, CE DELFT, p.83

équipements écologiques comme la propulsion vélique¹⁵². Des initiatives anglo-saxonnes ont déjà vu le jour pour adapter ce modèle au secteur du commerce maritime. C'est notamment le cas du « *Self-Financing Fioul-Saving Mechanism* » développé par l'University College de Londres et le cabinet d'audit PwC qui s'inspire du tiers financement pour l'appliquer à la rénovation de navires¹⁵³. Une généralisation du tiers financement pour les navires pourra ainsi permettre aux armateurs d'envisager plus facilement la transition de leurs navires vers la propulsion vélique. D'autant que le tiers financement comprend la prise en charge par le tiers de toute la maîtrise d'ouvrage y compris la phase d'étude du projet, déchargeant ainsi l'armateur de ces éléments et s'occupant de la totalité de la mise en œuvre du projet.

Solutions de financement - Le financement privé – L'actionnariat peut permettre aux entreprises recherchant à développer la propulsion de financer leurs projets à l'instar de Neoline qui a fait entrer en début d'année la Compagnie maritime havraise Sogestran dans son capital¹⁵⁴ réalisant ainsi une « Private Equity ». Cet acte a pour objectif d'accompagner l'armateur Neoline dans le financement de son projet de navires véliques, les Neoliners dont deux ont une mise à l'eau prévue en 2022¹⁵⁵. Michel Pery, président de Neoline souligne ainsi que le projet est financé à hauteur de 20-30% de fonds propres et le reste étant de la dette auprès de banques. La dette est également une solution de financement mais peut être difficile à obtenir les banques nécessitant des garanties afin d'accorder celle-ci. Également, le secteur maritime étant spécifique, les grandes banques ont des services dédiés aux affaires maritimes¹⁵⁶, ce que n'ont pas toutes les banques françaises limitant les banques auxquelles un acteur maritime peut s'adresser.

¹⁵² N. REHMATULLA, T. SMITH, p. 8, *Op. Cit.* p. 48

¹⁵³ V. STULGIS, T. SMITH, N. REHMATULLA, J. POWERS, J. HOPPE, Hidden Treasure: Financial models for retrofits, *University College London Energy Institute Reports*, Juin 2014, p.32

¹⁵⁴ V. GROIZELEAU, « *Cargos à voiles : Sogestran va entrer au capital de Neoline* », Mer et Marine, 05 février 2020, <https://www.meretmarine.com/fr/content/cargos-voiles-sogestran-va-entrer-au-capital-de-neoline> (Consulté le 25/06/2020)

¹⁵⁵ *Ibid.* p. 45, C. AUDIBERT

¹⁵⁶ Annexe 1 : Entretien avec Michel Pery, Neoline, 15 Juillet 2020

Ainsi, la propulsion vélique peut être intéressante pour répondre aux exigences réglementaires actuelles. Cependant ce moyen de propulsion sera limité par des facteurs structurels et physiques. Même si son intérêt au regard de la problématique environnementale est grande, son expansion dans le secteur maritime sera difficile si ce n'est impossible sur certains secteurs.

PARTIE 2 : LA PROPULSION VELIQUE : UN BOULEVERSEMENT JURIDIQUE POUR LE COMMERCE MARITIME

La sécurité à bord des navires est assurée par quatre conventions piliers : la convention SOLAS (Safety of life at sea) de 1974 (entrée en vigueur le 25 mai 1980), la Convention sur le travail maritime de 2006 (entrée en vigueur le 20 août 2013), la STCW sur la formation des marins de 1978 (entrée en vigueur le 28 avril 1984) et la convention MARPOL de 1973 (entrée en vigueur le 2 octobre 1983). Ces conventions sont primordiales afin de maintenir un niveau de sécurité suffisant à bord. Ces conventions sont complétées par d'autres veillant également à la sécurité maritime comme la Convention COLREG de 1972 sur la navigation maritime. Ces conventions datant pour la plupart des années 1970, elles ne prennent pas en compte les avancées technologiques de ces dernières années. Les navires équipés de propulsion vélique, vont tout au long de leur existence devoir veiller à l'application de ces normes malgré les spécificités du navire, que ce soit au moment de la conception que de l'exploitation du navire.

Titre 1 : La conception du navire à propulsion vélique

Dès la conception du navire, les diverses problématiques de sécurité que pose la propulsion vélique doivent être prises en compte afin de correspondre aux conventions internationales et aux normes des sociétés de classification. La bonne conception du navire va être directement liée à sa bonne exploitation par la suite. L'Administration et les sociétés de classification vont avoir un rôle central dans l'adaptation de ces navires aux normes internationales.

Chapitre 1 : Divers acteurs dans la prise en compte de la sécurité dans la conception du navire vélique

Le navire vélique devra donc dans sa conception correspondre aux normes de sécurité des conventions piliers de la sécurité maritime. Pour s'assurer que ces normes sont respectées, l'Administration comme les sociétés de classification ont un rôle fondamental.

Section 1 : La sécurité du navire vélique et l'Administration de l'Etat du pavillon

Les règles internationales sur la sécurité des navires ne prennent pas en compte de tels équipements dans leur rédaction. La Convention SOLAS actuelle a par exemple été élaborée en 1974, elle ne prend donc pas en compte toutes les nouvelles technologies qui ont été développées récemment dans le milieu du commerce maritime.

Ainsi, certains équipements nouveaux peuvent ne pas se conformer strictement aux normes en vigueur. Or, la convention SOLAS fait partie de ces conventions maritimes largement ratifiées par tous les Etats du monde, elle se trouve donc applicable à la quasi-totalité de la flotte mondiale. L'adaptation des navires aux normes de la convention SOLAS s'est faite selon l'application de la « clause du grand-père » selon laquelle tous les navires précédant son entrée en vigueur ont un échancier pour s'adapter à ces normes mais tous les navires construits à partir de cette date doivent nécessairement la prendre en compte. Ainsi tous les projets de navires à propulsion vélique doivent prendre en compte la Convention SOLAS.

La solution dégagée pour adapter les navires aux normes SOLAS, qui ne prennent pas en compte les spécificités de tels équipements, est d'effectuer des analyses de risques. Ces analyses vont ainsi démontrer l'existence d'un niveau équivalent de sécurité par rapport aux normes internationales¹⁵⁷. Les sociétés de classification vont donc avoir rôle clé en l'absence de normes prenant en compte les équipements véliques dans la réalisation de ces études¹⁵⁸.

Si la société de classification ne peut démontrer après une étude qu'un niveau équivalent de conformité est atteint, le choix final de certification du navire revient à l'Administration de l'Etat du pavillon. Il est donc nécessaire de présenter à l'Administration comment l'équipement vélique correspond par équivalence aux normes internationales¹⁵⁹. A toutes les étapes de la vie du navire, l'Administration de l'Etat du pavillon a un rôle dans le contrôle du navire au regard des normes de sécurité.

¹⁵⁷ Lloyds Register, p.13, *Op. Cit.* p. 22

¹⁵⁸ Voir Partie 2, Titre I, Chapitre 1, Section 2 sur la question du rôle des sociétés de classification

¹⁵⁹ Lloyds Register, p.14, *Op. Cit.* p. 22

Déjà dès la conception l'Administration de l'Etat du pavillon peut effectuer un contrôle. Conformément à la Règle I/6 a) de la Convention SOLAS, « *L'inspection et la visite des navires, en ce qui concerne l'application des dispositions des présentes règles et l'octroi des exemptions pouvant être accordées, doivent être effectuées par des fonctionnaires de l'Administration.* ». Ce contrôle peut s'effectuer avant ou pendant la construction du navire. Ce rôle peut toutefois être délégué aux sociétés de classification. En France, conformément à l'article 14 du décret n°84-810 du 30 août 1984¹⁶⁰, pour l'octroi du pavillon français, la Commission centrale de sécurité (CCS) va effectuer une analyse des plans et documents de sécurité du navire lors de la demande de francisation du navire de l'armateur.

Ensuite, lors de la construction, complétant le premier examen de la CCS, un contrôle supplémentaire est effectué par des visites de l'Administration du chantier. La France a un système renforcé de visite du chantier par rapport à la règle I/7 b) i) de la Convention SOLAS qui ne prévoit qu'une seule visite initiale. L'Administration française peut donc réaliser des visites spéciales conformément à l'article 130.60 de l'arrêté 23 novembre 1987 relatif à la sécurité des navires. Ces visites spéciales organisées par le chef du centre de sécurité des navires à la demande de l'Administration peuvent avoir plusieurs justifications dont « *compléter un dossier d'étude de navire* », « *pour la surveillance de la construction, de la refonte, des réparations, des modifications, des transformations d'un navire* » ou « *d'une manière générale, pour répondre à toute question spécifique en matière de sécurité et de prévention de la pollution par le navire* ». Comme déjà souligné pour les navires au GNL¹⁶¹, cette spécificité française permet à l'Administration de s'intéresser plus en profondeur à certains points d'intérêts et notamment lorsqu'il s'agit de nouvelles technologies. Les navires véliques pourront donc faire l'objet de visites spéciales pour contrôler spécifiquement les équipements véliques et avoir ainsi un contrôle complet à la suite du contrôle des plans par la CCS.

Lors de la mise en service du navire, l'Administration aura toujours un rôle de contrôle. Ce contrôle a lieu au regard du code ISM qui prévoit en son Chapitre 13 des audits

¹⁶⁰ Décret n°84-810 du 30 août 1984 modifié, relatif à la sauvegarde de la vie humaine en mer, à la prévention de la pollution, à la sûreté et à la certification sociale des navires, JORF du 1er septembre 1984, p.2778.

¹⁶¹ P-A. ROCHAS, *La sécurité du navire utilisant du GNL comme combustible*, Mémoire de Master, Université d'Aix-Marseille, 2019, p.45 §34

réalisés par l'Administration de l'Etat du pavillon qui est complété par un audit interne du propriétaire du navire prévoit au Chapitre 12. Les audits de l'Administration ont chaque année pour vérifier la conformité du document de conformité (§13.4), selon le paragraphe 13.8 une vérification intermédiaire a lieu entre la deuxième et la troisième date anniversaire de la délivrance du Certificat de gestion de la sécurité et tous les cinq ans est réalisée une vérification de renouvellement en vue du renouvellement du certificat de gestion de la sécurité et du document de conformité. Par ces audits, souvent délégués aux sociétés de classification en réalité, l'ensemble des questions de sécurité abordées par le Code ISM vont être vérifiées régulièrement prenant en compte les spécificités du navire. Le navire obtient donc par ces audits un Certificat de gestion de la sécurité. Le Code ISM envisage la possibilité que celui-ci soit provisoire, pour une période ne dépassant pas six mois, en son Chapitre 14 lorsque « *une compagnie vient d'être créée ou de nouveaux types de navires doivent être visés par le document de conformité existant* ». Ce document assure à l'Administration la possibilité de contrôler correctement et précisément les navires utilisant de nouvelles technologies sur ces particularités tout en accordant une flexibilité à l'armateur.

Finalement, le navire est davantage contrôlé pendant son exploitation par un suivi de l'Administration, tous les autres documents de sécurité font l'objet de renouvellement et donc de visites de contrôle tous les cinq ans conformément à la Convention SOLAS (Chapitre I/B).

Toutes ces visites de contrôle devront prendre en compte les spécificités du navire vélique, par exemple contrôler la structure au regard de ces équipements, les vibrations des équipements etc... Ils sont donc primordiaux pour assurer la sécurité de ces navires mais sont également complétés par l'action des sociétés de classification.

Section 2 : La sécurité du navire vélique et les sociétés de classification

Les sociétés de classification ont pour rôle de certifier et de donner une classe à un navire attestant de sa bonne navigabilité. Elles ont ainsi un rôle dès la conception du navire afin de s'assurer que celui-ci est construit conformément à leurs exigences et celles des conventions internationales. La classification du navire n'est pas le résultat d'une exigence des conventions internationales, rien n'oblige sur le plan international un armateur à avoir recours à une société de classification, toutefois la classification et même une bonne classification est nécessaire afin d'assurer le navire, c'est, en effet, une des exigences obligatoires de compagnies d'assurance. Les sociétés de classification sont regroupées, pour les meilleures, au sein de l'Organisation Internationale de sociétés de classification (IACS). Ces sociétés de classification établissent ainsi des normes de construction des navires relativement équivalentes avec des techniques homogénéisées par l'IACS. La société de classification du navire intervient également sur le chantier afin d'approuver les plans de construction du navire, vérifier la conformité des matériaux utilisés, le bon état des soudures... etc au travers de diverses inspections par ses équipes du chantier. La cote du navire sera finalement déterminée à la suite d'une visite finale de mise en service à la fin du chantier. Ainsi de par leur rôle dans la sécurité du navire, les sociétés de classification doivent s'adapter au fur et à mesure des évolutions techniques et des spécificités des nouveaux navires afin de pouvoir attester de leur bon fonctionnement. Pour cela elles émettent des guides ou des règles rassemblant les normes à respecter selon le type du navire. Les équipements véliques ne vont pas être classés au même titre que le navire mais vont faire l'objet d'une approbation de type et vont être pris en compte également dans la classification du navire.

La plupart des grandes sociétés de classification de l'IACS a établi des « guides » ou des règles pour les navires de commerce à propulsion vélique : ABS¹⁶², Lloyds¹⁶³,

¹⁶² AMERICAN BUREAU OF SHIPPING, « *Guide for Wind Assisted Propulsion System Installation* », Juin 2020

¹⁶³ LLOYDS REGISTER, « *Rules for sail assisted ships* », Juillet 2019

LLOYDS REGISTER, « *Guidance notes for Flettner Rotors Approval* », Mai 2015

LLOYDS REGISTER, « *Provisional Rules for Sail-Assisted Ships* », Janvier 2008

NKK¹⁶⁴, DNV-GL¹⁶⁵... Le rôle des « guides » et des « règles » publiés par les sociétés de classification est différent. Les règles sont des recueils de normes plus généraux sur un type de navire en particulier, par exemple, les navires de commerce. Alors que les « guidance notes » ou « guides » ont pour objectif de donner les indications techniques et des conseils dans la construction de certains navires, les informations données dans ces « guides » ne doivent pas nécessairement être respectées pour obtenir la classification de la société de classification concernée, même si le respect de ces indications est fortement recommandé¹⁶⁶. Ainsi la Lloyds a émis des Règles pour les « *sail assisted ships* » mais aussi des « *Guidance notes* » pour les navires équipés de Rotors, les règles s'appliquent également aux navires équipés de Rotors mais leur classification est complétée par ces « *Guidance notes* ».

Les sociétés de classification ajoutent ainsi pour les navires véliques répondant à leurs normes une mention spéciale sur le certificat de classification « *Sail Assisted* »¹⁶⁷ pour la Lloyds, « WAPS » (« *Wind assisted propulsion systems* ») pour DNV-GL, Wind-Assisted+ pour ABS. La NKK distingue selon le type de propulsion vélique avec des mentions différentes : « *Equipped with Wind Assisted Propulsion System – Sail* (ou « – *Rotor* » ou « – *Kite* ») », les abréviations de ces mentions seront alors : « EQ-WAPS-S », « EQ-WAPS-R » ou « EQ-WAPS-K ».

Le champ d'application de ces règles est toutefois limité. Il est spécifié dans les règles de la Lloyds que tout navire équipé d'équipement vélique ne pouvant pas obtenir la classification « *Sail Assisted* » sera tout de même contrôlé selon ses spécificités¹⁶⁸. De plus, si ces normes ne sont pas encore totalement mises au point pour tous les types de propulsion vélique, les armateurs devront fournir aux sociétés de classification une évaluation des risques, montrant que les risques auxquels peut être confronté le navire du fait des équipements véliques sont correctement pris en compte par le système de gestion de la sécurité du navire et que celui-ci est donc prêt à répondre à ces risques¹⁶⁹.

¹⁶⁴ NIPPON KAIJI KYOKAI, « *Guidelines for Wind Assisted Propulsion Systems for Ships* », Septembre 2019

¹⁶⁵ DNV-GL, « *Standards on wind assisted propulsion systems* », Novembre 2019

¹⁶⁶ BUREAU VERITAS, <https://marine-offshore.bureauveritas.com/rules-guidelines> (Consulté le 28/07/2020)

¹⁶⁷ *Ibid.* p. 65, LLOYDS REGISTER, « *Rules for sail assisted ships* »

¹⁶⁸ *Idem* p. 4, 1.6.2

¹⁶⁹ *Ibid.* p. 17, CE DELFT, p.73

De plus, ces normes ne valent que pour les navires dont la propulsion vélique assiste une autre propulsion qui est principale. Pour des navires dont la propulsion vélique est la propulsion principale, les règles applicables sont celles des voiliers classiques qui ne prennent pas en compte les spécificités technologiques des nouveaux moyens de propulsion vélique. Cette distinction dans la classification selon que la propulsion vélique soit d'assistance ou principale a des conséquences. Lorsque la propulsion vélique est en assistance, le contrôle sur le grément sera moins approfondi que lorsqu'elle est principale. Dans la première situation, les inspecteurs des sociétés de classification vont davantage se reposer sur les calculs des personnes de l'art, alors que dans le second c'est le grément lui-même qui va faire l'objet du contrôle¹⁷⁰. Toutefois, comme indiqué par Michel PERY, des travaux sont en cours par les sociétés de classification pour mieux harmoniser et adapter les méthodes de classification.

¹⁷⁰ Annexe 1 : Entretien avec Michel Pery, Neoline, 15 juillet 2020

Chapitre 2 : De nombreuses problématiques de sécurité liées aux équipements véliques.

Champ d'application de la Convention SOLAS – La Convention SOLAS s'applique à tous les navires effectuant des voyages internationaux (Règle 1) sauf les navires de guerre et aux transports de troupes, les navires de charge d'une jauge brute inférieure à 500, les navires sans moyens de propulsion mécanique, les navires en bois de construction primitive, les yachts de plaisance ne se livrant à aucun trafic commercial et les navires de pêche (Règle 3). Les navires de commerce véliques effectuant des voyages internationaux doivent donc respecter les normes de la Convention SOLAS puisqu'ils ont bien un moyen de propulsion mécanique en parallèle de la propulsion vélique, ils correspondent au champ d'application de la Convention.

Applicabilité des normes de la Convention SOLAS aux équipements véliques – Structure et stabilité du navire – La stabilité du navire est un enjeu important dans la construction du navire vélique en ce que ce les équipements véliques sont de taille et de poids importants venant s'intégrer à la structure du navire. Cette intégration doit donc se faire nécessairement en prenant en compte la structure du navire. Celle-ci devra, si nécessaire, être renforcée pour correspondre aux dispositions du Chapitre II de la Convention SOLAS sur la structure, compartimentage et stabilité, machines et installations électriques du navire. La Règle 3-1 du Chapitre II prévoit ainsi que « *En sus des prescriptions prévues ailleurs dans les présentes règles, les navires doivent être conçus, construits et entretenus conformément aux prescriptions d'ordre structurel, mécanique et électrique d'une société de classification reconnue par l'Administration [...], ou conformément aux normes nationales applicables de l'Administration qui prévoient un degré de sécurité équivalent.* ». Le pont doit également être renforcé pour pouvoir accueillir les installations. Ces renforcements de la structure entraînent ainsi un surcoût dans l'installation mais doivent également être pris en compte dès la conception pour correspondre aux exigences internationales. Certaines sociétés de classification se

sont ainsi progressivement intéressées à la propulsion vélique afin d'édicter des normes spécifiques¹⁷¹

Le fonctionnement des équipements véliques tels que les ailes, voiles ou rotors installés sur le pont du navire entraîne ce qui s'appelle en mécanique des fluides des « trainées parasites ». Ces forces qui ne sont pas ici utilisées à la propulsion mais qui sont le résultat de frottement sont ensuite répercutées sur la structure du navire et notamment la coque¹⁷² (ce n'est toutefois pas le cas pour les kites). La société de classification norvégienne DNV-GL soulève notamment l'existence de ces trainées parasites pour les éléments de voiles et de rotors Flettner¹⁷³. Cette force peut entraîner une gêne, voire, le lacet du navire. Ces mouvements du navire peuvent être limités par l'agencement des structures véliques à bord¹⁷⁴, cette question doit donc nécessairement se poser au stade de la conception du navire.

La société de classification Lloyds prévoit dans ses règles applicables aux navires équipés d'assistance vélique qu'en plus de respecter les normes normalement applicables en termes de structure selon la Partie 4 de ses Règles applicables aux navires que la « *conception, construction, stabilité et épaisseur des mats devront être adéquats afin de prévenir la survenue de flambage quelles que soient les conditions de chargement* ».

La Lloyds soulève en 2015¹⁷⁵ le risque que les questions de stabilité directionnelle et de manœuvrabilité de tels navires soient négligées au profit de la performance alors qu'elles sont des problématiques de sécurité importantes. Elle démontre ainsi que les équipements véliques ont montré diverses failles en ces domaines : difficulté de diriger le navire équipé de rotor à vitesse faible (6 nœuds)¹⁷⁶, amarrage plus difficile par une manœuvrabilité plus faible du fait des forces exercées par le vent sur ces structures imposantes sur le pont etc...

¹⁷¹ *Ibid.* p. 66, DNV-GL, « Standards on wind assisted propulsion systems »

Ibid. p.65, Lloyds Register, « Rules for sail assisted ships »

¹⁷² *Ibid.* p. 20, E&E CONSULTANT, p. 24

¹⁷³ *Ibid.* p. 66, DNV-GL, « Standards on wind assisted propulsion systems », p.21

¹⁷⁴ *Idem*

¹⁷⁵ *Ibid.* p. 22, Lloyds Register, p.15

¹⁷⁶ D. PEARSON, « The use of Flettner rotors in efficient ship design », Influence of EEDI on Ship Design, Londres, Royaume-Uni, 24-25 Septembre 2013

Vibrations – A l'étape de la conception, les vibrations induites par les équipements véliques doivent être étudiées¹⁷⁷. En effet, les rotors et les ailes en particulier peuvent provoquer des vibrations supplémentaires sur la structure du navire¹⁷⁸. Les vibrations ont un impact sur le mode de vie des équipages et peuvent causer de la fatigue supplémentaire. La fatigue est un phénomène très étudié à bord des navires notamment en ce qu'elle peut créer des erreurs humaines par manque de vigilance. Le programme de recherche sur la fatigue des marins dirigé par le professeur A. SMITH de l'Université de Cardiff a montré, à travers une enquête auprès de marins, les facteurs de cette fatigue¹⁷⁹. On distingue ainsi comme cause de la fatigue des combinaisons de facteurs comme le type de navire sur lequel le marin travaille mais aussi des facteurs environnementaux comme le bruit ou les vibrations du navire. Cette question est donc importante pour le bon déroulement du travail des équipages et de la vie à bord. La Convention sur le Travail Maritime (MLC) de l'OIT du 26 février 2006 (entrée en vigueur le 20 août 2013) a pris en compte cette question des vibrations. Cette Convention est marquée par la grande marge de manœuvre qu'elle offre aux Etats parties distinguant entre des règles, des normes et des principes directeurs qui n'ont pas tous la même force obligatoire. La seule norme, qui a une force obligatoire, mentionnant les vibrations dans la MLC est la Norme A3-1 : Logements et Loisirs venant énoncer que « *L'autorité compétente veille avec un soin particulier à l'application des prescriptions de la présente convention concernant : [...] c) le bruit et les vibrations ainsi que les autres facteurs ambiants* ». Les prescriptions sur les vibrations ne sont ensuite que des principes directeurs sans valeur obligatoire, où l'Administration est libre dans son application de ces mesures. Selon les Etats parties, ces principes directeurs pourront donc être interprétés plus ou moins strictement. Toutefois, l'homogénéisation des normes des sociétés de classification, à qui le contrôle est souvent délégué, permet d'appliquer ces principes de façon relativement harmonisée. La MLC contient ainsi un principe directeur 3.1.12 consacré à la question de la prévention du bruit et des vibrations selon lequel, entre autres, « *Le logement, les lieux de loisirs et le service de table ne devraient pas être exposés à des vibrations excessives.* ». Cette question se pose

¹⁷⁷ *Ibid.* p. 22, Lloyds Register, p.16

¹⁷⁸ *Ibid.* p. 69, D. PEARSON

¹⁷⁹ A. SMITH, P. ALLEN, E. WADSWORTH, « *Seafarer fatigue: the Cardiff research programme final report* », Centre de la psychologie de la santé au travail de l'Université de Cardiff, 2006, p. 16, 31

par la MLC pour les navires de charge mais se pose aussi particulièrement pour les navires à passagers à bord desquels le confort des passagers est encore plus primordial pour les armateurs. Même s'il existe peu de projet de navires à passagers équipés d'équipements véliques, l'exemple le plus marquant est le projet de MSC avec les Chantiers de l'Atlantique, cette question sera centrale dans les réflexions lors de la conception du navire.

La France a adopté un Décret n°2005-748 du 4 juillet 2005 relatif aux prescriptions de sécurité et de santé applicables en cas d'exposition aux risques dus aux vibrations mécaniques des personnels employés à bord des navires prévoyant des valeurs limites d'exposition au bruit et aux vibrations. Le respect de ces normes doit être vérifié par des mesures lors des contrôles réalisés par les organismes agréés (les sociétés de classification) conformément aux dispositions de l'article 42-2, alinéa 4 du Décret n°84-810 du 30 août 1984 relatif à la sauvegarde de la vie humaine en mer, à la prévention de la pollution, à la sûreté et à la certification sociale des navires.

Visibilité de la passerelle de navigation – Les équipements véliques représentent d'importantes structures placées sur le pont à l'instar des voiles ou des rotors Flettner. Ces éléments entravent ainsi la visibilité de la passerelle de navigation. Or, la Convention SOLAS en son Chapitre V, Règle n°22 prévoit des dispositions précises afin d'assurer la visibilité de la passerelle de navigation.

Bien des navires avec des équipements véliques peuvent ne pas correspondre à ces normes, il faudra donc prendre en compte dès la conception du navire ces dispositions, et à défaut (par contrainte notamment lors de l'installation d'équipements véliques après la construction du navire en retrofit) agir par équivalence. Cette équivalence devra, bien évidemment, intervenir uniquement après avoir recherché toutes les solutions possibles pour agir en conformité avec les dispositions de la Convention SOLAS. Cette recherche de conformité peut entraîner la réduction de la surface de voile des ailes ou la taille des rotors par exemple. De tels changements peuvent avoir un impact significatif avec les performances réalisées, la conception du navire devra alors se faire selon un balancier entre les performances souhaitées et la conformité avec les dispositions en vigueur.

La règle 22 prévoit ainsi en son point 3 qu'« *à bord des navires de conception classique qui, de l'avis de l'Administration, ne peuvent satisfaire à la présente règle, des*

dispositions doivent être prévues pour assurer un degré de visibilité aussi proche que possible de celui prescrit dans la présente règle. ». Il existe cependant une divergence entre la version française et la version anglaise de ce texte, la version anglaise est rédigée comme suit : « *On ships of unconventional design which, in the opinion of the Administration, cannot comply with this regulation, arrangements shall be provided to achieve a level of visibility near as practical to that prescribed in this regulation* ». Les notions de « navire de conception classique » et « *ships of unconventional design* »¹⁸⁰ sont de complets opposés. La convention SOLAS contient un article VIII selon lequel « *La présente Convention est établie en un seul exemplaire en langues anglaise, chinoise, espagnole, française et russe, chaque texte faisant également foi* ». Aucune de ces deux versions comprenant des notions antagonistes ne prime donc sur l'autre. Pour résoudre cette contradiction, la décision de savoir s'il est possible ou non d'agir par équivalence reviendra à l'Administration qui en agissant par pragmatisme choisira la version la plus claire et cohérente. Dans le cadre des navires possédant des équipements véliques, quelle que soit la version retenue par l'Administration, cette dernière pourra considérer la règle 22.3 comme applicable à ces navires. En effet, selon l'interprétation ces navires peuvent être de conception classique puisque, somme toute, ils ne sont que des navires conventionnels sur lesquels sont ajoutés des équipements particuliers, mais ils peuvent être considérés comme des navires à la conception non conventionnelle par cette particularité de la propulsion vélique. Le pragmatisme imposerait alors, quelle que soit la version favorisée, de permettre à ces navires de rentrer dans le cadre de la règle 22.3 afin d'adapter leur conception aux règles de la convention SOLAS lorsqu'aucune alternative n'est possible. Il semble évident que la volonté du rédacteur était ici de pallier l'inadaptation de la Convention aux éventuelles évolutions structurelles des navires et de leur permettre de correspondre aux normes de sécurité malgré le fait que la SOLAS ne prenne pas en compte leurs spécificités. Par une interprétation téléologique, il est ainsi possible de considérer que l'idée sous-jacente est de permettre l'adaptabilité de la Convention SOLAS aux différents navires même lorsque celui-ci connaît des contraintes physiques à son adaptation, que leur conception soit conventionnelle ou non.

¹⁸⁰ Traduction : « Navires de conception non conventionnelle »

L'Administration et les sociétés de classification ont alors un rôle à jouer dans la détermination de la conformité du navire et des équipements à ces dispositions de la Convention SOLAS. L'équivalence peut notamment être atteinte au travers de la pose de caméras et capteurs sur le navire¹⁸¹ afin de maintenir la visibilité optimale souhaitée par la Règle 22 bien que cette visibilité ne soit pas permise à l'œil humain sur la passerelle de navigation. Cette évolution vers les caméras et capteurs témoigne de l'obsolescence de la Convention SOLAS de 1974 actuelle par rapport à certains éléments et aux progrès technologiques.

Prise en compte dans la gestion de la sécurité – Le Code ISM (International Safety Management) prévoit la mise en place d'un Système de gestion de la sécurité au sein duquel se retrouvent des procédures à appliquer en cas d'urgence. Ces procédures doivent nécessairement prendre en compte la spécificité des équipements véliques et les risques qu'ils peuvent poser puisque l'enjeu du Code ISM est de pouvoir analyser les risques et y répondre au mieux. Certains risques spécifiques ont été relevés plus haut concernant la structure, la stabilité...etc. Il faut également prévoir la situation d'un mauvais fonctionnement des équipements véliques, il est nécessaire d'intégrer une procédure de réaction en cas de mauvais fonctionnement, ou d'urgence connue des équipages. C'est notamment le cas, comme le soulève la Lloyds, de la situation où les conditions météorologiques sont mauvaises et deviennent un danger pour le navire, elle enjoint donc les constructeurs à prévoir un système de neutralisation rapide de ces équipements pour pallier cette difficulté¹⁸².

Les incendies sont également une question fondamentale de sécurité des navires et les normes concernant leur prévention sont souvent celles les moins respectées¹⁸³. Les matériaux utilisés à bord ont un rôle dans la survenance de ces incendies notamment lorsque sont transportées des marchandises dangereuses inflammables ou des hydrocarbures. Les matériaux utilisés pour les équipements véliques, notamment lorsqu'il s'agit de voiles souples ou de kites, doivent donc prendre en compte les risques d'incendie. Le placement des équipements véliques devra également être un élément à prendre en compte dans le cargo plan de marchandises dangereuses inflammables.

¹⁸¹ Ibid. p. 22, Lloyds Register, p.15

¹⁸² Ibid. p. 22, Lloyds Register, p.14

¹⁸³ 2^e type de déficience le plus fréquemment relevée lors des inspections du Paris MoU

Ainsi, la conception du navire vélique, n'est pas la conception d'un navire classique, diverses questions de sécurité sont posées et doivent être résolues dès cette étape pour offrir au navire un bon état de navigabilité. L'Administration et les sociétés de classification veille ainsi à la prise en compte de ces éléments dans la conception et construction du navire, qui sont ensuite contrôlés lors de son exploitation qui peut être également particulière.

Titre 2 : L'exploitation du navire à propulsion vélique

Une fois le navire construit conformément aux exigences de sécurité des conventions internationales et des sociétés de classification, son exploitation aura également des particularismes à envisager dès à présent.

Chapitre 1 : La formation des équipages

La formation est une préoccupation dans l'installation d'équipement vélique. La plupart des entreprises les développant favorisent l'automatisation afin de limiter tout surcoût de personnel que cette installation pourrait engendrer et les formations comme l'indiquait Nicolas SDEZ, chef ingénieur chez AYRO¹⁸⁴, lors de l'Euromaritime 2020¹⁸⁵. Mais cette question de la formation reste une des préoccupations des armateurs dans l'adoption de la propulsion vélique¹⁸⁶ puisque malgré l'automatisation afin d'assurer la sécurité et des performances optimales au navire, la formation des équipages est nécessaire.

Section 1 : Une automatisation des équipements véliques

Une automatisation des équipements véliques systématique - L'automatisation est une constante des divers projets de propulsion vélique actuellement développés. Comme évoqué par Louis Dreyfus Armateur lors des Assises de l'Economie de la Mer 2019, l'idéal recherché est de n'avoir qu'un bouton on/off pour mettre en place les équipements véliques¹⁸⁷. Les ailes sont donc équipées par exemple de capteurs pour elles même chercher le vent. L'intérêt de l'automatisation est double. En effet, l'automatisation permet de réduire les coûts de main d'œuvre mais aussi les risques, les enjeux sont ainsi économiques et de sécurité. L'automatisation permet également de

¹⁸⁴ La société AYRO est une *start up* parisienne développant pour le cabinet d'architecture navale VPLP (en charge de la conception du navire Canopée chargé du transport de la fusée Ariane 6) des ailes.

¹⁸⁵ *Ibid* p. 39, Euromaritime 2020

¹⁸⁶ N. REHMATULLA, T. SMITH, p. 223, *Op. Cit.* p. 48

¹⁸⁷ *Ibid*. p. 39, Assises de la Mer

rendre accessible les équipements véliques à tout marin. Il a été bien rappelé lors des Assises de l'Economie de la Mer qu'il est hors de question pour les armateurs d'engager du personnel spécifique, des ingénieurs, pour ces équipements. Dès lors tout marin doit pouvoir facilement prendre en main les équipements véliques grâce à une automatisation.

Sécurité des systèmes d'automatisation des équipements véliques - Les accidents en mer sont pour 95% le fait d'erreurs humaines¹⁸⁸ selon, Jean-Pierre MANNIC, ancien directeur du Bureau enquêtes accidents / mer (BEAmer) de 2008 à 2012. L'automatisation des équipements des navires permet d'éviter la survenance de tels accidents, le risque présenté par le facteur humain est ainsi neutralisé en partie, l'automatisation des équipements rendant plus simple l'action des marins. Mais, tout comme il est nécessaire de former les marins afin d'assurer la sécurité à bord, il est nécessaire de s'assurer que les systèmes automatisés sont installés en toute sécurité et ne peuvent pas faire l'objet de défaillance mettant en péril la sécurité à bord.

La Convention SOLAS ne traite pas de telles technologies. La question de leur sécurité se traite donc au niveau de l'Administration et des sociétés de classification par un raisonnement par équivalence aux normes de sécurité internationales.

Tout de même, l'automatisation n'anéantit pas l'intervention des hommes dans la gestion des équipements véliques. La Lloyds a ainsi rappelé dans son étude sur la propulsion vélique¹⁸⁹ qu'il était nécessaire que ces équipements puissent être contrôlés. La formation des marins est donc primordiale.

¹⁸⁸ B. DUJARDIN, « L'homme au cœur de la sécurité maritime : Synthèse du colloque sur le facteur humain », Synthèse des journées internationales de l'enseignement et la recherche maritime, *La Revue Maritime*, n°490, p.62-67, Marseille, 25-26 Mars 2010, p. 62

¹⁸⁹*Ibid.* p.22, Lloyds Register

Section 2 : Une formation néanmoins nécessaire des équipages

Une formation des marins régulée par la Convention STCW – Bien que considérée comme contingente et superflue par bon nombre d'entreprises développant le vélique, la formation des marins est à prendre en considération en ce que les équipements véliques ont un impact sur la navigation quel que soit leur degré d'automatisation. La formation des marins est régulée par la convention STCW de 1978¹⁹⁰, bien évidemment cette convention ne prend pas en compte les spécificités de navires possédant des équipements véliques malgré deux amendements en 1995 et en 2010. Cette convention a été largement ratifiée, récemment par la France¹⁹¹, et représente 98% de la flotte mondiale. Les amendements de 2010 réalisés à Manille ont cherché à actualiser la Convention vis-à-vis des nouvelles technologies, cependant ces technologies étaient celles déjà existantes et particulièrement développées à ce moment-là, la question vélique n'a donc pas été abordée.

Cette convention prévoit notamment une résolution 1/14 selon laquelle les compagnies maritimes sont garantes du respect des dispositions de la convention. Elle énonce en effet : *« Les compagnies, les capitaines et les membres de l'équipage sont individuellement tenus de s'assurer que toutes les obligations énoncées dans la présente section sont pleinement remplies et que toute autre mesure nécessaire est prise pour que chaque membre d'équipage puisse contribuer en toute connaissance de cause à la sécurité de l'exploitation du navire. »* L'équipage à bord doit donc être compétent et en nombre suffisant, cela relève de la responsabilité de l'Armateur. Toutefois si aucune disposition particulière n'a été prise pour le vélique, pour assurer la sécurité du navire vélique et respecter la Convention STCW, les membres de l'équipage devront être formés un minimum sur les questions de sécurité liés à ces équipements.

¹⁹⁰ OMI, Convention internationale sur les normes de formation des gens de mer, de délivrance des brevets et de veille (STCW) telle qu'amendée, adoptée le 7 juillet 1978, entrée en vigueur le 28 avril 1984

¹⁹¹ Loi n° 2019-284 du 8 avril 2019 autorisant la ratification de la convention internationale sur les normes de formation du personnel des navires de pêche, de délivrance des brevets et de veille (STCW-F), JORF n°0084 du 9 avril 2019, texte n°3

Pour pallier ce manque, les armateurs choisissant l'option du vélique peuvent également compléter la formation de leurs équipages par des formations internes. Ils peuvent, en effet, développer des programmes de formations dédiés en leur sein afin de s'assurer d'une formation complète des équipages pour maîtriser les équipements véliques. Conformément à l'article L5547-3 du Code des transports¹⁹², ces centres de formation doivent être agréés par l'Administration. Cette initiative des armateurs peut ainsi permettre de s'adapter au mieux aux particularités du navire vélique.

Une performance dépendante des capacités de l'équipage et du capitaine – Cette adaptation est nécessaire en ce que la performance des équipements véliques va dépendre des qualités de l'équipage¹⁹³. Selon la Lloyds, les compétences du capitaine concernant l'interprétation de la route du navire et des conditions météorologiques vont être déterminantes dans les performances réalisées. Cet élément est cependant à nuancer en ce que les navires véliques sont pour la plupart automatisés pour la recherche de la route la plus optimale. La société de classification relève cependant des différences de performances sur des navires similaires, quel que soit le degré de technologie à bord selon les capacités des capitaines. La connaissance des spécificités des navires est un enjeu pour la manœuvrabilité de ceux-ci, les équipements véliques ayant une influence sur la manœuvrabilité, l'équipage doit pouvoir les prévoir et agir en conséquence¹⁹⁴. Il y a également nécessité que l'équipage puisse savoir contrôler et neutraliser les équipements en cas d'urgence. Cela est notamment vrai pour les équipements rétractables qui doivent pouvoir être rétractés manuellement en cas d'urgence, dès lors l'équipage doit être formé à ces procédures.

¹⁹² Décret n° 2019-640 du 25 juin 2019 relatif à l'agrément des organismes de formation professionnelle maritime, JORF n°0146, 26 juin 2019, texte n°28 ; Arrêté du 12 mai 2011 relatif aux agréments des prestataires délivrant une formation professionnelle maritime, JORF n°0121, 25 mai 2011, texte n°8, p.8996.

¹⁹³ *Ibid.* p. 22, Lloyds Register, p. 15

¹⁹⁴ *Idem*

Chapitre 2 : La navigation maritime d'un navire à propulsion vélique

L'exploitation des équipements véliques a une influence sur le déroulement du voyage maritime et de la navigation du navire puisque le navire est dépendant des vents.

Section 1 : L'impact de la propulsion vélique sur les règles du RIPAM

Le Règlement international pour prévenir les abordages en mer (RIPAM ou en anglais COLREG) de 1972 (entré en vigueur le 15 juillet 1977), annexé à la Convention SOLAS, a pour objectif de prévenir les abordages. Il établit ainsi des règles de navigation afin de fluidifier cette dernière. Ces règles ne sont, en France, pas considérées comme obligatoires en matière pénale selon la jurisprudence de la Cour d'Appel d'Aix-en-Provence contrairement à la matière civile où ces règles sont considérées comme obligatoires et représentent un véritable code de la navigation.

L'utilisation de la propulsion vélique a un impact sur les règles du RIPAM même si cette propulsion n'est qu'accessoire. En effet, les règles de priorité changent selon le moyen de propulsion utilisé par ces navires hybrides, la propulsion prise en compte pour déterminer la priorité est celle utilisée au moment du croisement des navires et non la propulsion principale du navire.

Notion de « navire à voile » - Selon l'article 3 §c du RIPAM, un navire à voile est un « *navire marchant à la voile, même s'il possède une machine propulsive, à condition toutefois que celle-ci ne soit pas utilisée.* ». Les règles de navigation du navire changent donc au cours du voyage selon le moyen de propulsion utilisé par le navire.

Toutefois, il est nécessaire dans un premier temps, de déterminer si le terme de « navire à voile » peut bien s'appliquer à tout type de propulsion vélique étant établi que ce terme regroupe une pluralité de techniques. L'expression « marchant à la voile » peut facilement s'appliquer à des voiles ou ailes rigides ou souples mais il est possible de se demander si on peut considérer des navires équipés de kites ou de rotors comme des « navires marchant à la voile » puisqu'il ne s'agit pas là d'un

gréement comme on l'entend classiquement. Il est possible pour cela de prendre une approche téléologique. L'idée des règles de priorité variant selon le mode de propulsion est de s'adapter à la manœuvrabilité plus difficile des navires marchant à la voile, les navires propulsés par kites et rotors étant soumis à des difficultés similaires liés à l'influence du vent peuvent bien être considérés comme des « navires marchant à la voile » si l'on retient cette interprétation.

Règles applicables aux « navires à voiles » - Lorsque la propulsion est vélique, l'article 12 de la convention COLREG dédié aux navires à voile s'applique. Selon cet article, lorsqu'un navire à voile en approche un autre, l'un doit s'écarter selon l'orientation du vent étant donné la difficulté de manœuvrabilité.

« i) Quand les navires reçoivent le vent d'un bord différent, celui qui reçoit le vent de bâbord doit s'écarter de la route de l'autre ;

ii) quand les deux navires reçoivent le vent du même bord, celui qui est au vent doit s'écarter de la route de celui qui est sous le vent ;

iii) si un navire qui reçoit le vent de bâbord voit un autre navire au vent et ne peut pas déterminer avec certitude si cet autre navire reçoit le vent de bâbord ou de tribord, le premier doit s'écarter de la route de l'autre. »

Règles de priorité entre navires à voile et navire à propulsion mécanique - Lorsque le navire utilise sa propulsion principale, et si cette propulsion est bien mécanique c'est-à-dire au sens de l'article 3 paragraphe b « mû par une machine », il devra respecter les dispositions de l'article 18 paragraphe a. Le navire n'a alors pas la priorité et devra alors s'écarter de la route « *d'un navire qui n'est pas maître de sa manœuvre ; d'un navire à capacité de manœuvre restreinte ; d'un navire en train de pêcher ; d'un navire à voile.* ». Lorsque la propulsion devient vélique, le navire devient prioritaire vis-à-vis des navires à propulsion mécanique faisant route et devra s'écarter de la route que « *d'un navire qui n'est pas maître de sa manœuvre ; d'un navire à capacité de manœuvre restreinte ; d'un navire en train de pêcher.* »

Identification de la propulsion d'un navire – Ces règles peuvent poser des difficultés et confusion afin d'identifier face à un navire hybride le navire ayant la priorité notamment lorsque les équipements véliques ne sont pas rétractables et que la

propulsion du navire n'est pas identifiable visuellement. Toutefois, tous les navires doivent être équipés d'un AIS (*Automatic Identification System*¹⁹⁵). Ce dernier est obligatoire selon la Règle 19 de la Convention SOLAS pour tous les navires effectuant un voyage international et de jauge brute supérieure ou égale à 300, tous les navires de charge n'effectuant pas de voyages internationaux de jauge brute supérieur ou égale 500 et tous les navires à passagers. Ce système fournit de façon automatisée aux navires aux alentours certaines informations. Parmi ces informations, est donné toutes les 2 à 10 secondes le statut de la navigation où le fait si le navire fait route à la voile ou route au moteur est indiqué. L'AIS permet donc facilement de déterminer la priorité entre les navires. Cependant, cette information doit habituellement être mise à jour manuellement par l'équipage, une attention particulière doit donc être donnée à cette information sur un navire vélique pour éviter toute mauvaise compréhension entre navires sur la priorité. L'automatisation des équipements véliques pourra sans doute permettre de mettre à jour le statut de la navigation évitant tout conflit. En cas de collision et de contentieux, le système d'automatisation ou les caméras, qui pourront être mises en place pour assurer la visibilité, pourront, sans doute, servir d'éléments de preuve de l'utilisation de la propulsion vélique au moment de la collision.

Section 2 : Une redéfinition du voyage maritime

Accessibilité des ports – L'une des préoccupations principales des professionnels cherchant à exploiter des navires à propulsion vélique est la question des tirants d'air¹⁹⁶. En effet, comme présenté préalablement, ces navires présentent des structures imposantes pouvant empêcher l'accès à certains ports. C'est le cas, par exemple, du port de New York dont l'accès se fait par un passage sous un pont, le pont Verrazzano. Les navires de croisière ou de commerce souhaitant exploiter une ligne passant par New York doivent ainsi nécessairement prendre en compte ce facteur, ce pont ne permettant

¹⁹⁵ Système d'identification automatique

¹⁹⁶ Sujet récurrent, abordé aux Assises de la Mer tout comme à l'Euromaritime : V. Bernatets, L. Detrimont, N. Joyeux, Y. Parlier, M. Pery, S. Warneys, « Kite, ailes, foils... les innovations nautiques irriguent le transport maritime », Assises de la Mer, Montpellier, France, 4 décembre 2019 ; N. Joyeux, M. Jobin, N. Sdez, M. Van Peteghem, « Propulsion vélique : des solutions qui arrivent à maturité », Euromaritime 2020, 4 Février 2020

le passage que de navires ayant un tirant d'air inférieur à 69m à marée haute. Certains Compagnies maritimes souhaitant passer par New York ont ainsi adapté leurs navires à ces spécificités comme le navire de croisière RMS Queen Mary 2 dont la cheminée a été abaissée spécifiquement pour réduire le tirant d'air du navire afin d'accéder au port de New York¹⁹⁷. La question du tirant d'air est également importante au regard de la manutention du navire, les équipements véliques devant le moins possible gêner les opérations de manutention. Cette question s'est donc posée pour la conception des navires à propulsion vélique. MSC a ainsi fait le choix du vélique (ailes rigides) pour deux de ses futurs paquebots en confiant la conception et construction aux Chantiers de l'Atlantique dont la livraison est prévue pour la fin de la décennie 2020¹⁹⁸. Ces derniers ont donc eu à résoudre la question du tirant d'air pour une aile rigide. Les projets optent ainsi pour la rétractabilité des ailes pour permettre de réduire quand nécessaire le tirant d'air du navire. Selon Vianney Vautier, architecte du projet pour MSC, ces voiles résolvent le problème du tirant d'air¹⁹⁹. Tous les projets de propulsion vélique proposent donc des systèmes rétractables ou affalables pour répondre à cette question. Si la rétractabilité ne pose aucune difficulté pour les kites, est envisageable pour les ailes ou voiles, elle n'est cependant pas possible pour les rotors, cette question est donc à prendre en compte pour l'exploitation d'un navire à propulsion vélique. Ces limites du navire dans son accès aux ports portent ultimement atteinte à son attractivité sur le marché de l'affrètement puisqu'il ne sera pas favorisé pour certaines lignes.

Opération de manutention – Une autre difficulté liée au tirant d'air est celle des opérations de manutention qui doivent s'adapter à ces équipements si ceux-ci ne sont pas suffisamment rétractables. La conception doit ainsi prendre en compte les opérations des grues et des divers appareils de manutention nécessaires pour le chargement et déchargement du navires en gardant une distance raisonnable avec les

¹⁹⁷ J. Barron, « *This Ship Is So Big, The Verrazano Cringes* », The New York Times, 18 avril 2004, <https://www.nytimes.com/2004/04/18/nyregion/this-ship-is-so-big-the-verrazano-cringes.html> (Consulté le 07/06/2020)

¹⁹⁸ E. Guimard, « MSC commande sa nouvelle génération de paquebots aux Chantiers de l'Atlantique », Les Echos, 19 Janvier 2020, <https://www.lesechos.fr/economie-france/conjoncture/msc-multiplie-les-commandes-aux-chantiers-de-latlantique-1164270> (Consulté le 07/06/2020)

¹⁹⁹ Voiles et Voiliers, « Paquebots à voile : les tests Solid Sail de Pornichet et les explications de l'architecte », Voiles et Voiliers, 20 janvier 2020, <https://voilesetvoiliers.ouest-france.fr/industrie-nautique/chantier/video-paquebots-a-voile-les-tests-solid-sail-de-pornichet-et-lesexplications-de-l-architecte-cb3b88a0-3879-11ea-9c0d-ad13099caebb> (Consulté le 07/06/2020)

grues²⁰⁰. Il est nécessaire également de permettre un accès facile aux cales du navire pour les opérations. Une mauvaise prise en compte de ces éléments entraîne une exploitation plus complexe du navire, pouvant le rendre de ce fait moins compétitif sur le marché de l'affrètement également. En effet, les affréteurs recherchent à optimiser au maximum les temps au port pour les opérations de chargement et de déchargement puisque la place à quai représente une somme importante et les navires sont souvent contraints par des emplois du temps à respecter. Une mauvaise conception du navire peut l'empêcher ainsi d'être exploité sur certains secteurs et le rendre moins compétitif. Certains navires peuvent également être conçus spécifiquement pour la desserte de ports particuliers, alors cette question ne pose pas de difficulté en ce qu'ils seront adaptés aux équipements du ports²⁰¹, toutefois cela limite les possibilités de transformation du navire pour se positionner sur d'autres secteurs, ce qui est généralement fait par les armateurs afin de répondre aux variations de la demande au sein du marché de l'affrètement.

Routage – La météorologie est un élément capital à la navigation d'un navire, quel que soit son moyen de propulsion. Une bonne connaissance de la météo permet de gagner à la fois en termes d'optimisation du voyage mais aussi de sécurité de celui-ci. Ce routage doit prendre en compte à la fois les performances du navire et sa sécurité mais aussi les obligations contractuelles de son exploitant souvent contraint par des délais à respecter selon la charte partie.

La propulsion vélique trouve là une limite, elle ne peut être efficace que sur des routes présentant des vents importants. La société Neoline a ainsi choisi d'exploiter la route Atlantique puisqu'elle présente des vents propices, étaient donc exclues les zones où il n'y avait pas de vent dans le développement de leur projet²⁰². En effet, le navire à propulsion vélique perd de son intérêt si les équipements véliques ne peuvent pas souvent remplacer la propulsion principale, sachant l'investissement représenté par ces installations, pour obtenir un retour sur investissement, les armateurs souhaitent pouvoir utiliser la propulsion vélique le vent le plus souvent possible, pour cela les routes doivent être adaptées. Les performances de la propulsion vélique sont donc dépendantes

²⁰⁰ *Ibid.* p.22, Lloyds Register, p. 15

²⁰¹ *Ibid.* p. 22, Lloyds Register, p. 15

²⁰² *Ibid.* p. 39, Assises de la Mer

de la météo de la zone, certaines routes étant ainsi plus favorables que d'autres pour l'exploitation de ces navires.

Concernant la sécurité, les voiles ou ailes, si elles ne sont pas rétractables et que la surface de prise au vent ne peut pas être diminuée, peuvent causer un danger pour le navire lorsque les vents sont importants²⁰³, une bonne optimisation de la route prise sera alors primordiale pour assurer la sécurité du navire et de son équipage.

Pour plus de performance et respecter les horaires du navire, le rôle des nouvelles technologies est encore une fois important. Le routage des navires est développé depuis plusieurs années afin notamment d'éviter les tempêtes et d'optimiser la consommation de fioul. Les compagnies maritimes ont ainsi développé des *fleet navigation and support centers* à qui reviennent ce rôle et qui, récoltant toutes les données du navire et de la zone fréquentée, vont fournir au capitaine des conseils sur la meilleure route à emprunter. Ce rôle peut également revenir à des bureaux de routage externes à l'entreprise maritime. Se sont développées des technologies permettant également un routage automatisé au travers d'algorithmes complexes prenant en compte divers facteurs donc les caractéristiques du navire et les conditions météorologiques en temps réel. Cependant, les recherches sur le routage météorologique des navires ne se concentrent que pour des navires classiques avec une propulsion au fioul, peu d'études portent spécifiquement sur le cas des navires véliques²⁰⁴, si bien que la recherche et développement est portée par les entreprises développant des équipements à propulsion vélique comme le cabinet d'architecture navale VPLP. Des projets sont ainsi en développement pour adapter ces algorithmes aux navires à propulsion vélique afin de proposer la meilleure route pour une optimisation des équipements véliques plusieurs modèles sont ainsi disponibles²⁰⁵. Le cabinet d'architecture navale VPLP, en charge notamment du projet du navire *Canopée* transportant la fusée Ariane 6²⁰⁶, Pour l'optimisation de la route du *Canopée*,

²⁰³ *Ibid.* p. 20, E&E CONSULTANT

²⁰⁴ Y. ZHANG, Y. LI, X YANG, Route optimization algorithm for minimum fioul consumption of wind assisted ship, *Journal of Applied Science*, Vol. 13, n°21, p. 4805

²⁰⁵ S. MARIE, E. COURTEILLE, « Fioul Consumption Minimization Procedure of Sail-assisted Motor Vessel based on a Systematic Meshing of the Explored Area », International Symposium on Ship Design & Construction : Environmentally Friendly Ships, Septembre 2009, Tokyo, Japon

²⁰⁶ Cluster Maritime, « VPLP Design signe son premier navire de transport maritime équipé des ailes Oceanwings® », Cluster Maritime, 22 octobre 2019, <https://www.cluster-maritime.fr/2019/10/22/vplp-design-signes-son-premier-navire-de-transport-maritime-equipe-des-ailes-oceanwings/> (Consulté le 07/06/2020)

le cabinet d'architecture naval VPLP a fait appel à la société D-Ice²⁰⁷. D-Ice est également présente pour les projets de Neoline, Louis Dreyfus Armateur et TOWT. Cette société est chargée du développement du programme de routage du *Canopée* et plus généralement des futurs navires équipés de ses ailes Oceanwings. L'exploitation du *Canopée* sur la route des Alizés permet des vents propices à l'exploitation d'un tel navire mais le programme développé permet au navire de s'adapter selon la météo pour obtenir la route optimale en termes de respect des horaires fixés et consommation de fioul. La tâche de ce routage est plus complexe en ce qu'il n'est pas ici question de seulement éviter les perturbations météorologiques comme le fait le routage maritime classique mais de rechercher les vents les plus favorables pour optimiser le voyage du navire²⁰⁸.

²⁰⁷ *Ibid.* p. 39, Euromaritime 2020

²⁰⁸ Y. ZHANG, Y. LI, X YANG, p. 4810, *Op. Cit.* p. 84

CONCLUSION

La propulsion vélique se fait donc un chemin progressivement vers le commerce maritime et va dans les années futures s'y développer de plus en plus. Les changements réglementaires de ces dernières années ont poussé les armateurs à prendre cette solution au sérieux et la décennie à venir sera déterminante pour démontrer que cette solution peut avoir un rôle dans le futur du commerce maritime.

Mais, diverses barrières structurelles se dressent face à la propulsion vélique, pour pouvoir s'installer dans le commerce maritime, ce dernier doit se repenser. Cependant ce secteur est particulièrement conservateur rendant ce développement difficile. Néanmoins, l'ouverture se fait progressivement sous les pressions réglementaires et les pressions sociétales qui augmentent.

Comme rappelé par Marc VAN PETEGHEM²⁰⁹, les objectifs vraiment contraignants sont à l'horizon 2050 et la durée de vie d'un navire est de maximum 25-30 ans, la prochaine génération de navires est donc celle de l'expérimentation, de la recherche pour permettre d'ici 2050 d'atteindre des alternatives durables et changer le paradigme propulsif du commerce maritime, dont la propulsion vélique fera peut-être partie.

²⁰⁹ Annexe 2 : Entretien avec Marc Van Peteghem, architecte naval, 27 juillet 2020

BIBLIOGRAPHIE

ACTES OFFICIELS

- **Sources internationales**

OMI, Convention internationale pour la prévention de la pollution par les navires (MARPOL), adoptée le 2 novembre 1973, entrée en vigueur le 2 octobre 1983.

OMI, Protocole de 1997 modifiant la Convention internationale de 1973 pour la prévention de la pollution par les navires, telle que modifiée par le protocole de 1978 y relatif, adopté le 26 septembre 1997, entré en vigueur le 19 mai 2005.

OMI, Résolution MEPC.176(58) adoptée le 10 octobre 2008, Amendements à l'annexe du protocole de 1997 modifiant la Convention internationale de 1973 pour la prévention de la pollution par les navires, telle que modifiée par le protocole de 1978 y relatif.

OMI, Résolution MEPC.177(58) adoptée le 10 octobre 2008, Code technique sur les NO_x

OMI, Résolution MSC.203(62) adoptée le 15 juillet 2011, Amendements à l'annexe du protocole de 1997 modifiant la convention internationale de 1973 pour la prévention de la pollution par les navires, telle que modifiée par le protocole de 1978 y relatif.

OMI, Comité de la protection du milieu marin, 75^e session, Proposition des Comores, « *Reduction of GHG emissions from ships : Wind propulsion solutions* » n°MEPC 75/INF.26, 24 Janvier 2020

OMI, Seconde étude sur les gaz à effet de serre, 2009

- **Sources européennes**

Directive 2003/87/CE du Parlement européen et du Conseil du 13 octobre 2003 établissant un système d'échange de quotas d'émission de gaz à effet de serre dans la Communauté et modifiant la directive 96/61/CE du Conseil, *JOUE* L275 du 25 Octobre 2003, p. 32-46

Directive 2012/33/UE du Parlement Européen et du Conseil du 21 novembre 2012 modifiant la directive 1999/32/CE en ce qui concerne la teneur en soufre des combustibles marins, *JOUE* L 327 du 27 novembre 2012, p.1-13

Directive (UE) 2018/410 du Parlement européen et du Conseil du 14 mars 2018 modifiant la directive 2003/87/CE afin de renforcer le rapport coût-efficacité des réductions d'émissions et de favoriser les investissements à faible intensité de carbone, et la décision (UE) 2015/1814, *JOUE* L76 du 19 Mars 2018, p.3-27

Règlement (UE) n°2015/757 du Parlement européen et du Conseil du 29 avril 2015 concernant la surveillance, la déclaration et la vérification des émissions de dioxyde de carbone du secteur du transport maritime et modifiant la directive 2009/16/CE, *JOUE* L 123 du 19 mai 2015, p.55-76

- **Jurisprudence**

Arab Maritime Petroleum Transport Co. V. Luxor Trading Corporation and Geogas Enterprise S.A. (The “AL BIDA”), 1987, Lloyd's Rep. 124 (Court of Appeal)

- **Sentences arbitrales**

London Arbitration 12/85 - LMLN 158

London Arbitration 2/87 - LMLN 188

OUVRAGES

J-P. BEURIER (dir.), « *Droits maritimes* », Dalloz, 3ème édition, 2014, 1792 pages.

P. BONASSIES, C. SCAPEL, « *Traité de droit maritime* », LGDJ, 3ème édition, 2016, 1056 pages.

T. COGLIN, A. BAKER, J. KENNY, J. KIMBALL, « *Time Charters* », Informa Law from Routledge, 7e édition, 2014, 1034 pages

P. DELEBECQUE, « *Droit maritime* », Dalloz, 2014, 896 pages.

M. GIMBUTAS, « *The goddesses and gods of Old Europe, 6500–3500 BCE: myths and cult images* », Berkeley: University of California Press, 2007, 304 pages

- V. HUGO, « *Les travailleurs de la mer* », Le livre de Poche, 2002, 674 pages
- A. MONTAS, « *Droit Maritime* », Vuibert, 2^e édition, 2014, 304 pages.
- T. NOTTEBOOM, « *Current issues in Shipping, Ports and Logistics* », University Press Antwerp, 2011, 602 pages
- H. N. PSARAFTIS, « *Sustainable Shipping : A Cross Disciplinary View* », Springer Nature Switzerland AG, 2019, 477 pages
- O. SCHINAS, « *Chapitre 8 : Financing ships of innovative technology* », dans « *Finance and risk management for international logistics and the supply chain* », S.GONG, K. CULLINANE, 2018, Pages 167-192
- S. SORRELL, E. O'MALLEY, J. SCHLEICH, S.SCOTT, « *The economics of energy efficiency : Barriers to cost-effective investment* », Edward Elgar Pub, Juillet 2003, 349 pages

MEMOIRES

- P-A. ROCHAS, *La sécurité du navire utilisant du GNL comme combustible*, Mémoire de Master, Université d'Aix-Marseille, 2019, 178 pages

ARTICLES DE REVUE

- P. AGNOLUCCI, T. SMITH, N REHMATULLA, Energy efficiency and time charter rates : some evidence quantifying the extent of split incentive problem in Panamax drybulk market, *Energy Policy*, Vol. 84, Septembre 2015, p. 44-57
- K. ANDERSON, A. BOWS, Executing a Scharnow Turn : Reconciling Shipping Emissions with International Commitments on Climate Change, *Carbon Management* 3, n° 6, 2012, p.615-628
- L. BERGESON, C. KENT GREENWALD, Sail Assist Developments 1979-1985, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, n°19, 1985, p.45-114
- T.J. CRAFT, H. IACOVIDES, N. JOHNSON, B.E. LAUNDER, Back to the future: Flettner-Thom rotors for maritime propulsion? *Turbulence Heat Mass Transfer*, 2012

- C. DE CET BERTIN, Etude juridique des émissions de gaz à effet de serre par les navires, *DMF*, n°815, Juillet 2019, p. 631-639
- R. DUCKWORTH, The application of elevated sails (kites) for fuel saving auxiliary propulsion of commercial vessels, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, n°20, 1985, p. 297-315
- L. FEDI, Le transport maritime international face à la pollution atmosphérique : enjeux du 21e siècle, *DMF*, n°737, Juin 2012, p.491-502
- L. FEDI, La surveillance, la déclaration et la vérification des émissions de CO2 du transport maritime, *DMF*, n°787, Janvier 2017, p. 7-19
- E. FOULQUIER, Transport maritime et changements climatiques, *DMF*, n°815, Juillet 2019, p. 581-589
- F.W. GEEL, A socio-technical analysis of low-carbon transitions: introducing the multi-level perspective into transport studies, *Journal of Transport Geography*, n°24, Septembre 2012, p. 471-482
- L. GRARD, Fabrication régionale d'un « droit maritime du climat » ou d'un « droit climatique du transport maritime », *DMF*, n°815, Juillet 2019, p.616-630
- A. HALFF, L. YOUNES, T. BOERSMA, The likely implications of the new IMO standards on the shipping industry, *Energy Policy*, n°126, 2019, p.277-286
- A. LARKIN, M. TRAUT, C. WALSH, A.FILIPPONE, Propulsive power contribution of a kite and a Flettner rotor on selected shipping routes, *Applied Energy*, Janvier 2014
- M. LOYD, Crosswind kite power, *J Energy*, Vol. 4, n°3, n°80-4575, 2012
- S. MANDER, Slow steaming and a new dawn for wind propulsion : A multi level analysis of two carbon shipping transitions, *Marine Policy*, n°75, 2017, p. 210-216
- R. LU, J.W. RINGSBERG, Ship energy performance study of three wind-assisted ship propulsion technologies including a parametric study of the Flettner rotor technology, *Ships and Offshore Structures*, 2020, Vol.15, n°3, p.249-258

- M.F PLATZER, N. SARIGUL-KLIJN, J. YOUNG, M.A. ASHRAF, J.C.S. LAI, Renewable hydrogen production using sailing ships Platzer, *Journal of Energy Resources Technology*, Vol. 136, Juin 2014, p. 021203/1-5N.
- N. REHMATULLA, T. SMITH, Wind Technologies : Opportunities and barriers to a low carbon shipping industry, *Marine Policy*, n°75, Décembre 2015, p. 217-226
- I. ROJON, C. DIEPERINK, Blowin' in the wind? Drivers and barriers for the uptake of wind propulsion in international shipping, *Energy Policy*, Avril 2014, Vol. 67, p. 394-402
- H. ROSS, O. SCHINAS, Empirical evidence of the interplay of energy performance and the value of ships, *Ocean Engineering*, Vol. 190, 2019
- G.B.SEBOLD, A Sailing Ship Without Sails: New Wonder of the Seas, *Popular Science Monthly*. Février 1925
- P. C. SHUKLA AND K. GHOSH, Revival of the Modern Wing Sails for the Propulsion of Commercial Ships, *Engineering and Technology International Journal of Physical and Mathematical Sciences*, 2009, Vol.3, n°3, p.207-212
- V. STULGIS, T. SMITH, N. REHMATULLA, J. POWERS, J. HOPPE, Hidden Treasure: Financial models for retrofits, *University College London Energy Institute Reports*, Juin 2014
- I.M. VIOLA, M. SACHER, J. XU, F. WANG, A numerical method for the design of ships with wind-assisted propulsion, *Ocean Engineering*, n°105, 2015, p.33-42
- C. WALSH, A. BOWS, Size Matters : Exploring the importance of vessel characteristics to inform estimates of shipping emissions, *Applied Energy*, 2012
- L. ZELDOVICH, In pursuit of clean, inexpensive propulsion, engineers harness a very old source of powerwind with some very modern designs, *Mechanical engineering*, Février 2020, p.44-49
- Y. ZHANG, Y. LI, X YANG, Route optimization algorithm for minimum fuel consumption of wind assisted ship, *Journal of Applied Science*, Vol. 13, n°21, p. 4805-4811

ACTES DE COLLOQUE ET CONFERENCES

V. BERNATETS, L. DETRIMONT, N. JOYEUX, Y. PARLIER, M. PERY, S. WARNEYS, « Kite, ailes, foils... les innovations nautiques irriguent le transport maritime », Assises de la Mer, Montpellier, France, 4 décembre 2019

G. CLODIC, A. BABARIT, JC. GILLOTEAUX, « Wind propulsion options for energy ships », Proceedings of the 1st International Offshore Wind Technical Conference, San Francisco, Californie, Etats-Unis, 4-7 Novembre 2018

B. DUJARDIN, « L'homme au cœur de la sécurité maritime : Synthèse du colloque sur le facteur humain », Synthèse des journées internationales de l'enseignement et la recherche maritime, *La Revue Maritime*, n°490, p.62-67, Marseille, 25-26 Mars 2010

ENERCON, « Enercon Presentation », 4st Conference on ship efficiency, Hambourg, Allemagne, 23-24 Septembre 2013

S.E. HIRDARIS, « The Role of Technology in Green Ship Design », Proceedings of the 11th International Marine Design Conference, p. 21-40, Glasgow, Royaume-Uni, 11-14 Juin 2012

N. JOYEUX, M. JOBIN, N. SDEZ, M. VAN PETEGHEM, « Propulsion vélique : des solutions qui arrivent à maturité », Euromaritime 2020, 4 Février 2020

R. KARSLEN, G. PAPACHRISTOS N. REHMATULLA, « The diffusion of wind propulsion technologies in shipping: an agent-based model », 9th International Sustainability Transitions Conference, Manchester, Royaume-Uni, Mai 2018

R. LU, J.W. RINGSBERG, W. MAO, « Wind-assisted propulsion for shipping: status and perspectives », International Conference on Ships and Offshore Structures 2017, Shenzhen, Chine, 11-13 Septembre 2017

E. MACRON, R. SAADE, H. GUILLOU, C.SCHOELINCK, Y. SOUAMI, P. LOUIS-DREYFUS, F.GAILL, « Entretiens de personnalités maritimes avec le président de la république », Assises de la Mer, Montpellier, France, 3 décembre 2019

S. MARIE, E. COURTEILLE, « Fioul Consumption Minimization Procedure of Sail-assisted Motor Vessel based on a Systematic Meshing of the Explored Area », International Symposium on Ship Design & Construction: Environmentally Friendly Ships, Septembre 2009, Tokyo, Japon

P. NAAIJEN, V. KOSTER, « Performance of auxiliary wind propulsion for merchant ships using a kite. », Proceedings of the 2nd International Conference on Marine Research and Transportation, p. 45-53, Naples, Italie, 28-30 Juin 2007

K. OUCHI, K. UZAWA, A. KANAI, M. KATORI, « “Wind Challenger” the Next Generation Hybrid Sailing Vessel », Proceedings of the Third International Symposium on Marine Propulsors, p. 562-567, Launceston, Tasmanie, Australie, Mai 2013

D. PEARSON, « The use of Flettner rotors in efficient ship design », Influence of EEDI on Ship Design Conference, Londres, Royaume-Uni, 24-25 Septembre 2013

O. SCHINAS, D. METZGER, « Financing ships with wind – assisted propulsion technologies », The Royal Institution of Naval Architects Wind Propulsion Conference, Londres, Royaume-Uni, 15-16 Octobre 2019

F. SENGER, J. KÖHLER, « Transitions to low carbon ship propulsion technologies including wind, simulated with an agent-based model using evolutionary approaches », Shipping in Changing Climates Conference, Karlsruhe, Allemagne, 2015

PUBLICATIONS ET RAPPORTS

AMERICAN BUREAU OF SHIPPING, « *Guide for Wind Assisted Propulsion System Installation* », Juin 2020

ARMATEURS DE FRANCE, Fiche « *Le transport maritime de vrac sec* », 2017

F. BALLINI, D. NEUMANN, J. BRANDT, A. AULINGER, A. OLCER, M. VOLKER, « *Sail into a Sustainable Future: Air pollution, health and economic assessment report* », NRS Sail, Novembre 2015

CE DELFT, « *Study on the analysis of market potentials and market barriers for wind propulsion technologies for ships* », Novembre 2016

CNUCED, « *Etudes sur les transports maritimes 2019* », 2019

DNV-GL, « *Standards on wind assisted propulsion systems* », Novembre 2019

E&E CONSULTANT, « *Wind propulsion technologies review* », Octobre 2013

ENERCON GmbH, « *Rotor sail ship E-Ship 1 saves up to 25% fioul* », Enercon Press release, 29 Juillet 2013

EUROPEAN COMMUNITY SHIPOWNERS ASSOCIATION, « *European shipping sets ambitious goals for its next chapter : Strategic priorities for EU shipping policy 2019–2024* », 2019

J. FABER, D. NELISSEN, S. AHDOUR, J. HARMSSEN, S. TOMA, L. LEBESQUE, « *Study on the completion of an EU framework on LNG-fuelled ships and its relevant fuel provision infrastructure: Analysis of the LNG market development in the EU* », Commission Européenne, 2015, n° B-1049

LLOYDS REGISTER, « *Wind-power shipping : a review of the commercial, regulatory and technical factors affecting uptake of wind assisted propulsion* », Février 2015

LLOYDS REGISTER, « *Rules for sail assisted ships* », Juillet 2019

LLOYDS REGISTER, « *Guidance notes for Flettner Rotors Approval* », Mai 2015

LLOYDS REGISTER, « *Provisional Rules for Sail-Assisted Ships* », Janvier 2008

G. MANNARINI, « *The twofold aspect of climate change on navigation: the search for new maritime routes and the challenge of reducing the carbon footprint of ships* », Rapport technique du Centre Euro-Méditerranéen sur le changement climatique, n° RP0252, Mars 2015

NIPPON KAIJI KYOKAI, « *Guidelines for Wind Assisted Propulsion Systems for Ships* », Septembre 2019

ROYAL ACADEMY OF ENGINEERING, « *Future Ship Powering Options : Exploring alternative methods of ship propulsion* », Juillet 2013

SKYSAILS, « *New Energy For Shipping : Press Kit* », Janvier 2011

A. SMITH, P. ALLEN, E. WADSWORTH, « *Seafarer fatigue : the Cardiff research programme final report* », Centre de la psychologie de la santé au travail de l'Université de Cardiff, Novembre 2006

TRANSPORT ET ENVIRONNEMENT, « *Do gas trucks reduce emissions?* », Septembre 2019

C. VALERO, « *Une énergie économique et écologique : la force du vent* » Note de synthèse ISEMAR, n°210, Mai 2019

H. WINNES, M. GRANBERG, K. MAGNUSSON, M. MALMAEUS, A. MELLIN, H. STRIPPLE
K. YARAMENKA, Y. ZHANG, « *Scrubbers: Closing the loop : Environmental analysis of marine exhaust gas scrubbers on two Stena Line ships* », Report from the IVL Swedish Environmental Research Institute, 2018

ARTICLES DE PRESSE

F. AUVRAY, « *Le transport se cherche un avenir décarboné* », La Mer, Notre Avenir, n°18, Novembre 2019, p.7

J. BEQUIGNON, « *Un grain de Sail dans le café* », La Mer, Notre Avenir, n°18, Novembre 2019, p.6

C. LACHANCE, « *Le premier cargo à voile* », Marine & Océans, n°265, 4^e trimestre 2019, p.40

T. TEILLARD, « *Ariane met le shipping dans le vent* », Le Marin, 17 octobre 2019, p.19

SITES INTERNET

Armateurs de France, <http://Armateurs de France.org>

C. AUDIBERT, « *Neoliner : le premier cargo "vert"* », Paris Match, 09/06/2020, <https://www.parismatch.com/Actu/Environnement/Neoliner-le-premier-cargo-vert-1688688>, (Consulté le 25/06/2020)

Ayro, <https://ayro.fr/>

Baltic Exchange, <http://www.balticexchange.com/>

J. **BARRON**, « *This Ship Is So Big, The Verrazano Cringes* », The New York Times, 18 avril 2004, <https://www.nytimes.com/2004/04/18/nyregion/this-ship-is-so-big-the-verrazano-cringes.html> (Consulté le 07/06/2020)

A. **BERTI**, « *Will wind-assisted propulsion blow the maritime industry away ?* », Ship-technology, 3 mars 2020, <https://www.ship-technology.com/features/wind-assisted-ship-propulsion/> (Consulté le 11/04/2020)

B. **BEZIAT**, « *Bassin d’Arcachon : le kite d’Yves Parlier va prendre son envol* », Sud Ouest, 14 février 2019, <https://www.sudouest.fr/2019/02/14/le-kite-de-parlier-va-prendre-son-envol-5820050-2918.php> (Consulté le 17/06/2020)

H. **BIELAK**, « *Les cargos à voile de Neoline veulent verdir le transport maritime* », Capital, 02 juillet 2019, <https://www.capital.fr/economie-politique/les-cargos-a-voile-de-neoline-veulent-verdir-le-transport-maritime-1343641>, (Consulté le 26/06/2020)

Blue Technology, <https://bluetechnology.dk/>

C. **BRITZ**, « *Une rotor sail installée sur le ferry Copenhagen* », Mer et Marine, 27 mai 2020, <https://www.meretmarine.com/fr/content/une-rotor-sail-installee-sur-le-ferry-copenhagen> (Consulté le 06/06/2020)

Cluster Maritime, « *VPLP Design signe son premier navire de transport maritime équipé des ailes Oceanwings®* », Cluster Maritime, 22 octobre 2019, <https://www.cluster-maritime.fr/2019/10/22/vplp-design-signe-son-premier-navire-de-transport-maritime-equipe-des-ails-oceanwings/> (Consulté le 07/06/2020)

Equasis, equasis.org

Energies de la mer, « *A voiles et à moteurs : Le Rotor Sail de Norsepower Oy est homologué* », 07 mars 2019, <https://www.energiesdelamer.eu/publications/59-navires-installateurs/5114-voile-moteur-rotor-norsepower-oy> (Consulté le 15/02/2020)

V. **GROIZELEAU**, « *Cargos à voiles : Sogestran va entrer au capital de Neoline* », Mer et Marine, 05 février 2020, <https://www.meretmarine.com/fr/content/cargos-voiles-sogestran-va-entrer-au-capital-de-neoline>, (Consulté le 25/06/2020)

V. GROIZELEAU, « *Paquebots à voiles: sauf MSC, Saint-Nazaire ne pourra rien vendre avant des années* », Mer et Marine, 12 février 2020, <https://www.meretmarine.com/fr/content/paquebots-voiles-sauf-msc-saint-nazaire-ne-pourra-rien-vendre-avant-des-annees>, (Consulté le 27/06/2020)

E. Guimard, « *MSC commande sa nouvelle génération de paquebots aux Chantiers de l'Atlantique* », Les Echos, 19 Janvier 2020, <https://www.lesechos.fr/economie-france/conjoncture/msc-multiplie-les-commandes-aux-chantiers-de-latlantique-1164270> (Consulté le 07/06/2020)

IWSA, <http://wind-ship.org/>

R.KANTHARIA, « *Top 7 Green Ship Concepts Using Wind Energy* », Marine Insight, 7 Octobre 2019, <https://www.marineinsight.com/green-shipping/top-7-green-ship-concepts-using-wind-energy/> (Consulté le 15/12/2019)

Le Marin, « *Neoline signe une lettre d'intention de commande avec Neopolia* », Le Marin, 1 Juillet 2019, <https://lemarin.ouest-france.fr/secteurs-activites/chantiers-navals/34562-neoline-signe-une-lettre-dintention-de-commande-avec> (Consulté le 16/02/2020)

Le Marin, « *Un peu de vert pour les navires dans le projet de loi de finances* », Le Marin, 17 Octobre 2019, <https://lemarin.ouest-france.fr/secteurs-activites/shipping/35182-un-peu-de-vert-pour-les-navires-dans-le-projet-de-loi-de-finances>, (Consulté le 20/06/2020)

Maersk, « *Glossary of terms* », Octobre 2014, https://web.archive.org/web/20141031150023/http://files.shareholder.com/downloads/ABEA-3GG91Y/2428187051x0x577328/e3c9f031-6baa-4f11-ac1e-5e58c20bf35e/Definitions_UK.pdf, (Consulté le 26/07/2020)

J. MAKKAR, « *Speed and Consumption Warranties in Time Charterparties* », LinkedIn.com, 4 Novembre 2016, <https://www.linkedin.com/pulse/speed-consumption-warranties-time-charterparties-jagmeet-singh-makkar/> (Consulté le 11/06/2020)

Ministère de la Transition Ecologique, Prix des produits pétroliers, 6 Juillet 2020 <https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/prix-des-produits-petroliers>, (Consulté le 24/07/2020)

Neoline, <https://neoline.eu/>

Paris MoU, <https://www.parismou.org/>

T. ROMANACCE, « *Un énorme navire à voile transportera la fusée Ariane 6* », Capital, 14 Octobre 2019, <https://www.capital.fr/entreprises-marches/un-enerme-navire-a-voile-transportera-la-fusee-ariane-6-1352713>, (Consulté le 20/06/2020)

Sail Cargo Alliance, <http://sailcargoalliance.org/>

H.M. THOMAS, « *Un porte-conteneurs de CMA CGM équipé d'un kite à l'horizon 2020* », Le Marin, 31 mai 2018, <https://lemarin.ouest-france.fr/secteurs-activites/nautisme/31526-un-porte-conteneurs-de-cma-cgm-sous-voile-echeance-2020>, (Consulté le 16/04/2020)

D. VAN HEUSDEN – VAN WINDEN, « *EU-backed Wind-Assist Ship Propulsion Project Sets Sail on its Three-Year Voyage* », Northsearegion.eu, 4 Novembre 2019, <https://northsearegion.eu/wasp/news/eu-backed-wind-assist-ship-propulsion-project-sets-sail-on-its-three-year-voyage/> (Consulté le 10/06/2020)

L. VOGDRUP-SCHMIDT, « *The shipping industry is too conservative and passive* », Shippingwatch, 23 Juin 2015, <https://shippingwatch.com/Services/article7817989.ece>, (Consulté le 17/12/2019)

Voiles et Voiliers, « *Paquebots à voile : les tests Solid Sail de Pornichet et les explications de l'architecte* », Voiles et Voiliers, 20 janvier 2020, <https://voilesetvoiliers.ouest-france.fr/industrie-nautique/chantier/video-paquebots-a-voile-les-tests-solid-sail-de-pornichet-et-lesexplications-de-l-architecte-cb3b88a0-3879-11ea-9c0d-ad13099caebb> (Consulté le 07/06/2020)

20 minutes, « *Saint-Nazaire: Les Chantiers de l'Atlantique testent une voile innovante pour les... paquebots* », 20minutes.fr, 20 Décembre 2020, <https://www.20minutes.fr/planete/2679459-20191220-saint-nazaire-chantiers-atlantique-testent-voile-innovante-paquebots> (Consulté le 25/07/2020)

ANNEXES

ANNEXE 1 : Entretien téléphonique avec Michel Péry, Président de Neoline, 15 juillet 2020 - Réservée

ANNEXE 2 : Entretien téléphonique avec Marc Van Peteghem, architecte naval, 27 juillet 2020 - Réservée

TABLE DES MATIERES

Remerciements.....	2
Table des abréviations	3
Introduction.....	8
I. Historique de la propulsion vélique : Des innovations basées sur une technique ancienne.....	9
II. Contexte de la propulsion vélique : Une technique résurgente au service des nouveaux besoins du commerce maritime	12
III. Etat de la propulsion vélique aujourd'hui : une diversité de moyens.....	16
A. Des projets de voiliers cargos à propulsion principale vélique limités	16
B. Une pluralité de méthodes.....	18
1. Propulsion assistée par kites.....	18
2. Propulsion par Rotor Flettner	21
3. Propulsion par voile.....	23
Partie 1 : La propulsion vélique : une opportunité économique pour le commerce maritime	25
Titre 1 : Un potentiel important du développement de la propulsion vélique	25
Chapitre 1 : L'évident potentiel de la propulsion vélique	26
Section 1 : Un potentiel environnemental.....	26
Section 2 : Un potentiel économique	28
Chapitre 2 : Un potentiel à mettre en comparaison avec d'autres moyens de propulsion innovants	33
Titre 2 : Des barrières structurelles au développement de la propulsion vélique	36
Chapitre 1 : Une émergence difficile de la propulsion vélique	36
Section 1 : Des difficultés liées aux risques de la propulsion vélique	37
Section 2 : Des difficultés inhérentes à la propulsion vélique	42

Chapitre 2 : Un développement difficile des projets de propulsion vélique	46
Section 1 : Une recherche d'acteurs pour adopter la propulsion vélique.....	46
Section 2 : Une recherche de financement complexe	52
Partie 2 : La propulsion vélique : un bouleversement juridique pour le commerce maritime	59
Titre 1 : La conception du navire à propulsion vélique	59
Chapitre 1 : Divers acteurs dans la prise en compte de la sécurité dans la conception du navire vélique	59
Section 1 : La sécurité du navire vélique et l'Administration de l'Etat du pavillon	60
Section 2 : La sécurité du navire vélique et les sociétés de classification	63
Chapitre 2 : De nombreuses problématiques de sécurité liées aux équipements véliques.....	66
Titre 2 : L'exploitation du navire à propulsion vélique.....	73
Chapitre 1 : La formation des équipages.....	73
Section 1 : Une automatisation des équipements véliques	73
Section 2 : Une formation néanmoins nécessaire des équipages	75
Chapitre 2 : La navigation maritime d'un navire à propulsion vélique.....	77
Section 1 : L'impact de la propulsion vélique sur les règles du RIPAM.....	77
Section 2 : Une redéfinition du voyage maritime	79
Conclusion.....	84
Bibliographie.....	85
Annexes.....	97
Table des matières	98

RESUME – Le futur du commerce maritime doit mettre en œuvre un changement de paradigme majeur des moyens de propulsion des navires. En effet, le commerce maritime dépend majoritairement sur le pétrole, matière qui a vocation à disparaître et dont les émissions polluantes sont de plus en plus encadrées par l’OMI. Les nouvelles réglementations visant à réduire les émissions polluantes mènent ainsi les acteurs du commerce maritime à envisager diverses alternatives.

Parmi ces alternatives figurent la propulsion vélique qui est de plus en plus considérée comme une solution sérieuse. La propulsion vélique présente des avantages évidents permettant de réduire les émissions polluantes tout en économisant de l’argent sur le prix du carburant. Toutefois ce moyen de propulsion est confronté à des barrières rendant son développement difficile que ce mémoire a vocation à étudier.

SUMMARY - The future of maritime trade must implement a major paradigm shift in the means of ship propulsion. Indeed, maritime trade depends mainly on oil, a material that is destined to disappear and whose polluting emissions are increasingly regulated by the IMO. The new regulations aimed at reducing polluting emissions are thus leading actors in maritime trade to consider various alternatives.

Among these alternatives is the use of wind propulsion, which is increasingly seen as a serious solution. There are clear advantages to using wind assistance to reduce emissions while saving money on fuel costs. However, this means of propulsion faces barriers that make its uptake difficult, which this thesis intends to study.