

Intérêt et analyse de la propulsion éolienne pour les navires de travail et de commerce

Philippe PALLU de la BARRIÈRE, Jérôme VÉDRENNE

CRAIN – La Rochelle

SOMMAIRE

Les contraintes économiques, l'augmentation importante du prix du carburant, la volonté politique de réduire les gaz à effet de serre (GES) amènent à considérer les systèmes alternatifs propulsifs pour les navires.

Dans cet article sont présentés et analysés divers systèmes de propulsion éolienne auxiliaire dans la perspective d'une exploitation sur des navires de commerce ou de travail, en tenant compte des contraintes d'exploitation de ces navires (encombrement, sécurité, économie,...). Les divers aspects du problème sont abordés : les performances aérodynamiques, l'efficacité énergétique, l'influence des aspects météorologiques et les perspectives économiques.

Une étude de cas pour un pétrolier permet de quantifier le potentiel de la propulsion éolienne auxiliaire pour les navires.

SUMMARY

Economic pressure, fuel prize increase and political wish to reduce green house gas (GHG) lead to consider alternative mean of propulsion for commercial ships.

In this paper are presented and analyzed various auxiliary wind propulsion systems intended to be used onboard of commercial ships, taking into account operational constraints (size, safety, economy,...). All aspects of the problem are accounted for : aerodynamic performances, energetic efficiency, impact of weather conditions and economical view.

A case study, carried out for a tanker shows the potential of auxiliary wind propulsion for commercial ships.

1. INTRODUCTION

La voile a été jusqu'à la fin du XIX^{ème} siècle l'unique moteur des navires commerciaux et de travail, puis son utilisation a été rapidement abandonnée pour ces applications au profit de la propulsion thermique et confinée aux loisirs et aux sports nautiques, à travers la plaisance et la voile de compétition.

L'ascension quasi continue du cours du pétrole, qui s'est brutalement accélérée ces dix dernières années (figure 1), l'incertitude sur les niveaux de ressources en énergie fossile, combinées à la prise de conscience politique

sur les conséquences écologiques du rejet massif dans l'atmosphère de gaz à effet de serre conduisent à rechercher des solutions alternatives pour la propulsion des navires, plus propres et plus économiques.

Pour lutter contre la hausse du prix du carburant, la première mesure prise par les armateurs et les exploitants est de réduire la vitesse des navires. Cette mesure permet également de diminuer les émissions de gaz à effet de serre.



Figure 1 : Prix du baril de pétrole depuis 1990

L'Union Européenne s'est engagée unilatéralement pour 2020 à une réduction des émissions de gaz à effet de serre de 20% par rapport au niveau de 1990, et envisage une réduction de 60% à 80% pour 2050 par rapport au niveau de 1990. En 2012, les pays membres de l'Union Européenne ont déjà réduit leurs émissions de 18 % par rapport au niveau de 1990 [1] et sont largement en mesure de tenir leur engagement. D'autre part l'IMO souhaite limiter à 0,5% à partir de 2020 le niveau de SOx dans le fioul, ce qui impliquerait l'utilisation généralisé du fioul distillé à la place du fuel lourd avec pour conséquence une augmentation du coût du carburant de 25%.

Si la volonté politique de vouloir réduire les émissions de gaz à effet de serre semble présente, cela ne pourra cependant se faire que si la compétitivité économique est préservée. Le vent est une source d'énergie inépuisable, gratuite, propre à la libre disposition des navires. Il apparaît donc naturel de chercher à tirer profit de l'énergie éolienne pour la propulsion des navires. Cependant, un retour complet à la marine à voile n'est pas réaliste. En revanche, l'usage d'une source de propulsion complémentaire à celle du moteur principal et de son hélice qui diminuerait la consommation énergétique globale, avec un encombrement à bord modéré et dont l'exploitation peut être menée sans augmentation du nombre de membres d'équipage a de quoi séduire et mérite d'être explorée.

Les voiles traditionnelles ne sont pas le seul moyen capable d'extraire de l'énergie du vent, les éoliennes en sont un bon exemple. Dans le domaine naval, les systèmes propulsifs éoliens alternatifs sont pour l'instant restés à un stade

confidentiel et n'ont existé qu'à l'état de prototypes. Le plus ancien est le rotor Flettner, du nom de son inventeur, qui se compose simplement d'un cylindre tournant, ce qui grâce à l'effet Magnus, permet de développer de la portance et par là même une force propulsive. Ce système date de 1925. Le second système est celui du profil aspirant, basé sur l'aspiration de la couche limite d'un profil d'aile afin d'en augmenter la portance. Ce principe, bien connu des aérodynamiciens et étudié dans le domaine aéronautique depuis longtemps, a été porté dans le domaine naval sous l'impulsion du Commandant Cousteau qui en a doté son navire l'Alcyone (Figure 4).

Ces deux types de propulseur éoliens ont la particularité d'être, contrairement aux voiles traditionnelles, des systèmes à apport d'énergie. Il faut un moteur pour faire tourner le rotor Flettner et un système d'aspiration dans le cas du profil aspirant.

Ces systèmes n'ont pas connu de développement industriel ; leur intérêt économique n'étant pas suffisant malgré la première crise pétrolière de 1973.

D'autres systèmes sont également apparus plus récemment comme les cerfs-volants dynamiques qui présentent des caractéristiques intéressantes.

Le propulseur éolien auxiliaire devra répondre aux exigences actuelles de l'exploitation des navires, son installation doit respecter les critères de stabilité et de manœuvrabilité des navires, son encombrement sur le pont doit être compatible avec l'exploitation du navire, les opérations de chargement et de déchargement, un équipage doit pouvoir opérer le système sans qualification particulière.

L'exploitation du système éolien doit être sans danger pour le navire en toute circonstances, être conforme aux réglementations et aux normes de sécurité maritime.

Enfin, le propulseur éolien auxiliaire doit également respecter des critères économiques favorables à sa diffusion (prix d'acquisition, durée de vie, maintenance,...). Plusieurs questions se posent alors au concepteur ou à l'armateur qui souhaiterait envisager ces solutions :

- quelles sont les performances de ces systèmes à propulsion éolienne ?

- quelles sont les performances du navire en propulsion mixte, qui utilise à la fois son moteur principal et un propulseur éolien ?
- quelles sont les conditions météorologiques ou les routes propices à l'utilisation d'un navire équipé d'un propulseur éolien ?

Le CRAIN, fort de son expérience dans la propulsion éolienne pour les navires de plaisance ou de compétition, et dans la conception navale en général, a entrepris de répondre à certaines de ces questions et de développer des outils qui permettent l'étude de solutions de propulsion mixte pour les navires.

Une partie des travaux présentés ont été effectués dans le cadre du projet collaboratif FP7 ULYSSES [5] bénéficiant d'un cofinancement CE et dans le cadre d'un programme de recherche interne cofinancé par le FEDER, le MRES et la Région Poitou-Charente. Ce travail a aussi bénéficié de partenariats scientifiques avec l'ENSMA Poitiers (soufflerie) et l'Université de La Rochelle (CFD).

2. PROPULSEURS EOLIENS

Pour bien appréhender les qualités d'un propulseur éolien, il est nécessaire de rappeler quelques notions d'aérodynamique et leur implication sur la marche d'un navire.

Les efforts aérodynamiques se décomposent en une traînée, dirigée dans la direction de l'écoulement apparent et une portance, dirigée perpendiculairement à cet écoulement. En l'absence d'apport d'énergie, la traînée est dirigée dans le même sens que l'écoulement, lorsque le navire est plein vent arrière, la traînée est entièrement propulsive, en revanche, c'est ce qui empêche un voilier de naviguer face au vent. Cette traînée tendra à faire reculer le navire à partir du moment où le vent apparent souffle en avant du travers. La seconde composante, la portance, est quant à elle pleinement propulsive lorsque le vent apparent est par le travers du navire et est nécessaire à l'existence d'une force propulsive lorsque le vent apparent est en avant du travers. La capacité maximale du navire à remonter au vent sera liée à la finesse, le rapport de la portance sur la traînée ; il faut alors une portance importante et une traînée

faible (Figure 2). Une conclusion importante de ces remarques sur le fonctionnement du voilier est que le cahier des charges du propulseur éolien dépend de la direction du vent, ce qui se traduit sur un voilier par des voiles différentes pour chaque conditions. Il s'avère cependant que la capacité à générer une portance importante permet de produire une force propulsive dans la plupart des conditions si la finesse reste satisfaisante alors que la traînée n'a d'intérêt qu'aux vents "portants" venant de l'arrière, ce qui était le mode de fonctionnement de prédilection des navires du XVIII^{ème} siècle.

Un des inconvénients des voiles traditionnelles est la surface nécessaire pour générer une force propulsive suffisante pour que le navire atteigne une vitesse honorable. Cette surface, qui peut déjà être conséquente sur un bateau de plaisance devient considérable sur un navire de travail. Contrairement au nautisme, le navire peut difficilement être allégé sans réduire sa capacité de transport qui est sa raison d'être. L'encombrement sur le pont du système de propulsion éolien doit être limité, compatible avec les équipements du navire ; l'impact sur l'équipage doit être aussi faible que possible, en termes de compétences, de sécurité, de charge de travail.

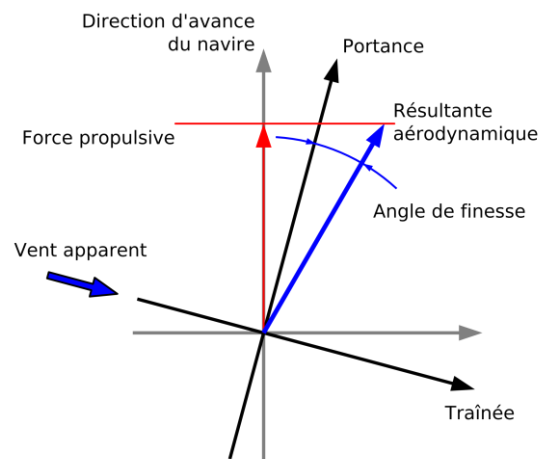


Figure 2: Position de la résultante aérodynamique selon l'angle de vent apparent et la finesse

Les efforts aérodynamiques s'expriment sous la forme :

$$F = \frac{1}{2} \rho V^2 \cdot S \cdot C_f \quad (1)$$

où V est la vitesse du vent apparent, S la surface et C_f un coefficient associé aux conditions de fonctionnement qui sera soit le coefficient de portance, soit le coefficient de traînée suivant la composante considérée.

Pour augmenter la force propulsive, la solution sur les voiliers est d'augmenter la surface des voiles car la vitesse du vent apparent est fixée et les coefficients de portance et de traînée dépendent de la forme de la voile, de son réglage et de la direction du vent.

C'est ici que naît l'intérêt des propulseurs éoliens qui peuvent être envisagés sur des navires de travail, à savoir les profils aspirants, les rotors ou les cerfs-volants dynamiques (kites pour les anglophiles).

Les deux premiers systèmes, bien que basés sur des phénomènes physiques différents¹, permettent d'obtenir un résultat similaire : une très forte portance par unité de surface. Là où le coefficient de portance des voiles est limité à des valeurs de l'ordre de 1,5, le coefficient de portance de ces systèmes peut atteindre des valeurs de 8 à 10, soit 5 à 7 fois plus. À portance égale, il sera donc possible de réduire dans le même rapport la surface du système, un avantage indéniable sur le pont surchargé des navires.

Le cerf-volant est quant à lui basé sur un principe différent. Il est composé d'une aile, qui possède des caractéristiques aérodynamiques du même ordre de grandeur qu'une voile traditionnelle, mais avec la possibilité de lui faire décrire des trajectoires à grande vitesse. Dans ce cas, c'est la vitesse du vent apparent qui va augmenter. Comme celui-ci intervient au carré dans le calcul de la portance, il sera alors possible de développer des forces importantes avec une surface bien plus faible que celle des voiles traditionnelles.

À partir de ces principes directeurs, la question est alors de savoir quelles peuvent être les performances aérodynamiques et énergétiques de ces types de propulseurs. Le CRAIN s'est attelé à cette tâche dans le but de pouvoir répondre aux questions des acteurs du domaine maritime.

2.1. Profil aspirant

La portance maximale qu'un profil est capable de développer augmente avec l'épaisseur relative et la cambrure de celui-ci. Ceci est vrai jusqu'à ce que l'écoulement décroche massivement ce qui limite en pratique l'augmentation de l'épaisseur des profils. Le principe du profil aspirant, développé pour l'aéronautique dès les années 40 et repris par L. Malavard [2] et B. Charrier pour la propulsion des navires en 1980 (Figure 4), est d'aspirer la couche limite à la paroi du profil afin de limiter ou de supprimer le décollement et ainsi de rétablir la portance (Figure 3).

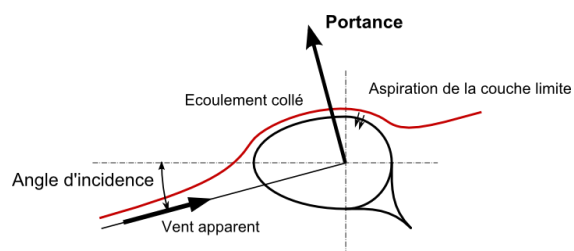


Figure 3 : Principe de fonctionnement du profil avec aspiration de la couche limite

En utilisant des profils épais, les portances accessibles deviennent très importantes avec des coefficients de portance de l'ordre de huit, soit quatre à huit fois supérieurs à ceux des voiles traditionnelles.



Figure 4: L'Alcyone du Commandant Cousteau avec ses profils aspirés de type Turbovoile

¹ Il y a très souvent confusion entre l'effet Magnus et le système du profil aspirant

Il faut injecter de l'énergie dans le système pour aspirer la couche limite mais la puissance propulsive générée est dans la plupart des cas bien supérieure à celle consommée par le système du fait de l'utilisation de l'énergie éolienne. La Figure 5 montre le rapport de la puissance propulsive générée par un profil aspirant sur la puissance consommée par le système pour son fonctionnement, selon l'angle de vent réel auquel navigue le navire.

$$\eta = \frac{P_{prop}}{P_{cons}} \quad (2)$$

Avec :

P_{prop} : puissance propulsive générée par le système éolien

P_{cons} : Puissance consommée par le système

Dans cet exemple, la vitesse du navire est de 10 nœuds, la vitesse du vent réel est de 20 nœuds. Le rendement du profil aspirant en tant que système propulsif éolien est supérieur à 1 dès 30° du vent et atteint des valeurs maximales proches de 10 à 150° du vent. Le fait d'avoir un rendement supérieur à l'unité vient du fait que l'énergie injectée dans le système est amplifiée par l'utilisation de l'énergie éolienne. Il est alors possible de parler de coefficient d'amplification de l'énergie plus que de rendement.

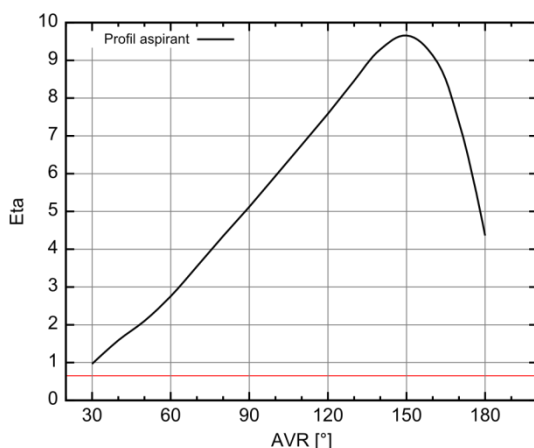


Figure 5 : Amplification de l'énergie par le profil aspirant, en fonction de l'angle de vent réel

La ligne rouge représente le rendement caractéristique d'une hélice. Sur tous les angles de vent réel représentés, le système éolien à profil aspirant est plus efficace qu'une hélice traditionnelle. En revanche, et c'est le cas ici, un système éolien d'une taille compatible avec les dimensions du navire ne permet pas de générer la totalité de la force propulsive nécessaire pour atteindre la vitesse désirée dans toutes les conditions ; la consommation totale peut ainsi être fortement diminuée, selon les conditions de vent et les dimensions du système éolien.

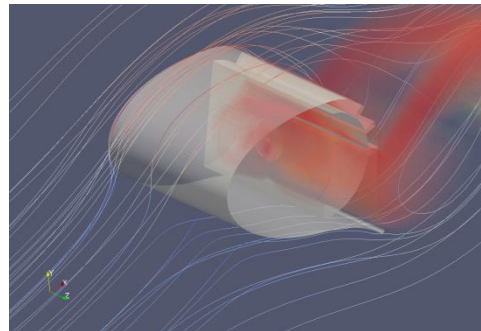


Figure 6 : Calcul numérique d'écoulement autour d'un profil aspiré

2.2. Rotor Flettner

Le principe du rotor Flettner est basé sur l'effet Magnus. Lorsqu'un cylindre est mis en rotation dans un écoulement, du fait du frottement, le fluide est accéléré sur la partie supérieure (figure 5) et ralenti sur la partie inférieure. Du fait de l'accélération, la pression est diminuée sur la partie supérieure et du fait du ralentissement, la pression augmente sur la partie inférieure. Cette différence de pression génère une portance sur le cylindre.

La portance ainsi générée peut atteindre des valeurs importantes avec des Cl bidimensionnels pouvant atteindre 10 dans certaines conditions. Cette portance est obtenue en contrepartie de l'énergie nécessaire à la mise en rotation du cylindre, cependant, comme pour le profil aspirant, le rendement propulsif, calculé par rapport à l'énergie nécessaire au fonctionnement du système est supérieur à 1 et il est possible de parler d'amplification de l'énergie.

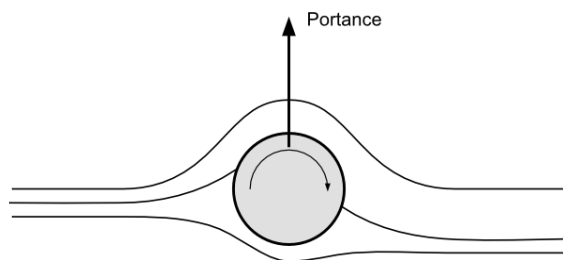


Figure 7 : Principe de fonctionnement du cylindre tournant

Le cylindre rotatif a fait l'objet de nombreux travaux comme par exemple ceux de B.Charrier [3] fournissant les coefficients de portance et de traînée en fonction de la vitesse de rotation. Cependant on ne dispose pas de mesures expérimentales précises des efforts d'entraînement, notamment en présence de plaques d'extrémité.

Le navire de charge "E-Ship 1" (Figure 8), actuellement en exploitation, est équipé de quatre rotors Flettner.



Figure 8: Le navire E-SHIP 1, équipé de quatre rotors Flettner

2.3. Cerf-volant dynamique

L'utilisation du cerf-volant pour les navires de commerce est basée sur l'idée d'augmenter la vitesse du vent apparent sur l'aile. Pour cela le cerf-volant est en mouvement permanent et parcourt une trajectoire imposée à la vitesse la plus grande possible. Les caractéristiques aérodynamiques intrinsèques d'une aile de traction comparable à celles des voiles traditionnelles. En l'absence de mouvement du cerf-volant par rapport au navire, les efforts résultants sont proches de ceux d'une voile de même surface. Une légère augmentation des efforts est toutefois possible pour un système statique car la vitesse du vent en altitude est plus importante qu'au niveau du pont du navire, par exemple la vitesse du vent

augmente de 50% entre dix et cent mètre d'altitude. Malgré cela, la surface d'un cerf-volant statique susceptible de participer significativement à la propulsion d'un navire de charge serait si élevée que les solutions qui permettraient le maintien en opération continue d'un tel système représente un véritable défi technologique.

Il est en revanche possible de maintenir le cerf-volant à une vitesse élevée par rapport au navire. On parle alors de cerf-volant dynamique. La physique du cerf-volant dynamique est décrite par exemple par Dadd [4]. Nous avons développé le simulateur dynamique SIMKITE qui permet de modéliser la physique et le comportement du cerf-volant dynamique. Cet outil permet par exemple de quantifier l'influence des effets inertiels qui apparaissent avec de grandes surfaces. Des cerfs-volants dynamiques pour la traction des navires sont produits et expérimentés sur des navires de charge par la société SkySail [5] (Figure 10). Le cerf-volant dynamique peut atteindre une vitesse de 200 km/h, ce qui permet d'obtenir des coefficients de poussée, exprimés en fonction de la vitesse du vent, six à dix fois supérieurs à ceux d'un cerf-volant stationnaire et de réduire d'autant la surface de l'aile à poussée égale.

Le cerf-volant est solidaire du navire par un câble qui transmet au navire les efforts de l'aile. La longueur de ce câble est constante ce qui définit une enveloppe de vol, assimilable à un quart de sphère, orientée selon la direction du vent apparent, que parcourt l'aile (Figure 9).

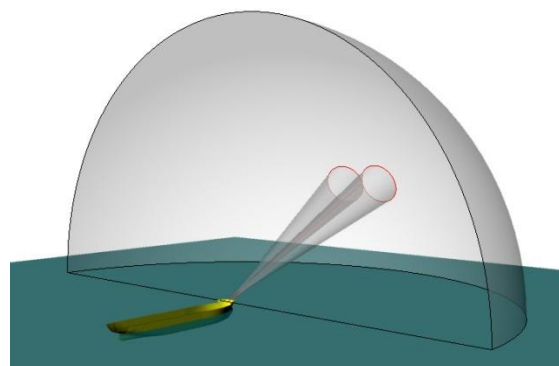


Figure 9 : Enveloppe de vol et trajectoire d'un cerf-volant dynamique pour un vent apparent venant de l'arrière

La capacité d'accélération de l'aile est d'autant plus grande que celle-ci se situe au centre de l'enveloppe de vol. Lorsque le vent apparent vient de l'arrière, l'axe de l'enveloppe de vol est alignée avec l'axe du navire, et la force propulsive est maximale ; lorsque le vent apparent est travers au navire, l'enveloppe de vol est également transversale au navire, mais aucune force propulsive n'est développée dans cet axe. Il faudra donc faire voler le cerf-volant vers l'avant du navire et sur un côté de l'enveloppe de vol, donc avec une efficacité diminuée. Ces éléments font que le cerf-volant dynamique est particulièrement efficace au vent arrière mais que la force propulsive développée chute rapidement dès que l'angle du vent apparent se ferme.

Un des paramètres importants de l'efficacité du système est la finesse aérodynamique de l'aile utilisée. Plus cette finesse sera grande, plus la traînée de l'aile sera faible et plus grande sera la vitesse atteinte (la vitesse de vol est à peu près proportionnelle à la finesse). Le vent apparent est alors augmenté ainsi que les efforts.

La principale difficulté technologique de ce système est de réaliser un automatisme qui soit capable de contrôler le cerf-volant en vol, de le maintenir sur une trajectoire performante et d'assurer le lancement et la récupération de l'aile, ceci dans les conditions d'exploitation du navire (8000h/an, équipage réduit,...).



Figure 10 : Cargo tracté par un cerf-volant (image Skysails)

2.4. Performances comparées

Différents critères doivent être pris en compte pour comparer les performances potentielles d'un propulseur éolien :

- la poussée surfacique qui caractérise l'encombrement du système et son acceptabilité.

- la consommation énergétique qui va influencer sur le rendement global énergétique du navire
- la finesse aérodynamique qui caractérise l'aptitude à fonctionner lorsque le vent apparent s'oriente vers l'avant du navire

Les dispositifs statiques et passifs tels que les profils épais multi-éléments permettent au mieux de doubler la poussée par rapport à des voiles traditionnelles. Ils ne consomment pas d'énergie et le finesse est bonne.

Un dispositif dynamique tel que le cerf-volant dynamique permet de multiplier par dix la poussée par unité de surface. L'emprise sur le pont est minimale. En revanche la finesse est faible, donc l'efficacité n'est très bonne que pour du vent portant (venant de l'arrière du navire) et ceci à condition pouvoir maintenir le propulseur opérationnel.

Les dispositifs statiques et actifs tels que le cylindre tournant, le profil aspiré ou le profil soufflé permettent de multiplier la poussée par 4 ou 5, en revanche ils consomment de l'énergie externe et leur finesse est moyenne. Leur fonctionnement peut facilement s'automatiser.

Le cylindre tournant est étudié depuis plusieurs dizaine d'années. La poussée est élevée mais la finesse est assez faible et peut être améliorée par l'ajout d'une plaque d'extrémité. Dans ce cas l'énergie d'entraînement est élevée.

L'aspiration a été étudiée depuis longtemps pour des applications aéronautiques. Une application à la propulsion éolienne, la Turbovoile, a été expérimentée sur l'Alcyon du Commandant Cousteau. Contrairement au cylindre tournant, la performance dépend de nombreuses options de conception qui conditionnent la qualité de l'écoulement interne et externe.

Si on ne considère que l'aérodynamique externe c'est à dire les coefficients de portance, de trainée et de puissance d'aspiration à la paroi du profil, les résultats expérimentaux de Malavard [2] nous montrent que le potentiel de la voile aspirante est supérieur à celui du rotor au niveau de l'énergie consommée pour l'aspiration et de la finesse. En pratique

ATMA 2014

l'obtention de ces avantages dépend beaucoup de la qualité de l'aérodynamique interne.

C'est pourquoi nous avons repris l'étude de la voile aspirante en prenant en compte l'écoulement interne en utilisant la simulation numérique et la soufflerie.

La présentation de ce travail n'est pas l'objet de cet article mais mentionnons cependant que les résultats obtenus, s'ils sont confirmés par l'expérimentation en navigation, nous indiquent que la technologie du profil aspiré permet de réaliser de la propulsion éolienne avec des performances comparées très

intéressantes au niveau énergie, économie et acceptabilité.

Le Tableau 1 donne des ordres de grandeur permettant de comparer les systèmes entre eux. La référence est le système de 4 voiles aspirantes décrit plus loin dont la hauteur de 24m est respectée par tous les systèmes. Les surfaces sont calculées pour délivrer une force aérodynamique identique pour tous les systèmes, et ceci pour un fonctionnement à un angle de vent apparent situé entre 40° et 120°. L'angle de finesse détermine l'orientation de la force aérodynamique par rapport au vent apparent du navire (Figure 2) :

	Surface	Angle de finesse	Conso. énergie externe
Voiles	2100 m ²	33°	
Profil épais symétrique	2500 m ²	22°	Nulle
Profil épais asymétrique à deux éléments	1250 m ²	19°	Nulle
Profil aspiré	400 m ²	19°	Modérée
Rotor Flettner avec plaque d'extrémité	390 m ²	23°	Importante
Cerf-volant dynamique	300 m ²	49°	Nulle

Tableau 1: Caractéristiques indicatives pouvant varier avec les solutions techniques adoptées pour chacun des systèmes

3. PREDICTION DE PERFORMANCES DU NAVIRE A PROPULSION EOLIENNE AUXILIAIRE

Dans le paragraphe précédent, la caractérisation des propulseurs éoliens a été menée sans prendre en compte le navire équipé de tels systèmes. Il faut maintenant analyser le fonctionnement du navire équipé de propulsion éolienne auxiliaire en fonction des conditions météorologiques rencontrées et des paramètres d'exploitation du navire.

Jusqu'à présent, l'analyse des voiliers et des navires à moteur étaient effectués selon deux méthodes distinctes, comportant cependant des similarités.

Pour les navires à moteurs, la méthode consiste à prédire la puissance nécessaire au moteur en fonction de la vitesse. Cela nécessite d'estimer le rendement de chaque composante de la chaîne de propulsion pour déterminer le rendement final qui est le rapport de la puissance propulsive sur la puissance délivrée par le moteur.

La prédiction de performances des voiliers est quant à elle réalisée par des programmes appelés VPP (pour Velocity Prediction Program). Ces modèles calculent des états d'équilibre pour au moins trois composantes des torseurs hydrodynamiques, aérodynamiques et gravité. Si l'objectif initial de ce type de programme était de déterminer la vitesse d'avance du voilier en fonction des

conditions de vent (vitesse et angle du vent par rapport à la marche du voilier), ce qui justifie le nom de cette catégorie de programmes, les informations obtenues comprennent également l'ensemble des paramètres de fonctionnement du voilier (par exemple la gîte, la dérive, les coefficients de portance des voiles et des appendices, etc...).

Dans le cadre de la propulsion mixte, ces deux approches doivent être combinées dans un même outil qui prenne en compte la physique des navires à moteur comme celle des voiliers, avec des complications supplémentaires issues des interactions entre les deux modes de propulsion.

En poursuivant la réflexion, et pour répondre aux problématiques énergétiques plus générales, apparaît clairement la nécessité de modéliser la chaîne énergétique de l'ensemble du navire. Des solutions innovantes apparaissent pour lesquelles, le nombre et la nature des systèmes augmentent. La production d'énergie par exemple peut provenir d'un ou plusieurs groupes électrogènes, de panneaux solaires, d'une pile à combustible, etc... Le navire sera modélisé comme une collection de sources, de consommateurs, de convertisseurs et de stockage d'énergie connectés entre eux.

Pour répondre à ces problématiques, fort de son expérience dans la conception et réalisation de logiciels de prédiction de performances, le CRAIN a développé l'outil numérique modulaire SIMWP afin de prendre en compte une grande diversité de configurations de navires. Il est conçu pour être pouvoir s'adapter rapidement à des systèmes énergétiques nouveaux et innovants. SIMWP permet d'une part d'estimer les aspects hydrodynamiques et aérodynamiques et d'autre part l'analyse des flux et des rendement énergétiques à bord du navire.

Le nombre de paramètres intervenant dans un tel système devient également important et chaque système comporte des limites de fonctionnement propres, par exemple en termes de puissance ou de température de fonctionnement,... L'outil développé au CRAIN est donc conçu pour optimiser les paramètres de fonctionnement afin d'atteindre un rendement optimal selon un critère choisi par l'utilisateur et en fonction d'un ensemble de contraintes qui peuvent être liées aux équipements, à la sécurité, etc...

Exemples de paramètres qui rendent nécessaires l'optimisation : puissance du système éolien, rendement et pas éventuel de l'hélice, direction de la force propulsive éolienne, etc...

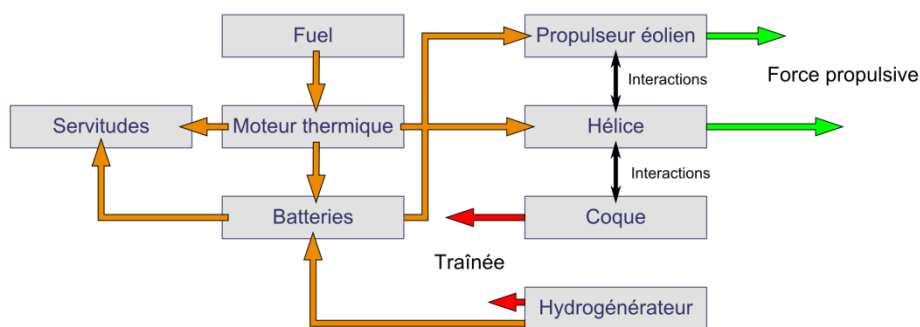


Figure 11 : Flux d'efforts et flux énergétiques dans le programme de prédiction de performances

4. OPTIMISATION DE LA ROUTE

La contribution de la propulsion éolienne à la propulsion dépend beaucoup des conditions

météorologiques rencontrées. S'il respecte le temps imparti pour le trajet, le navire peut emprunter la route qui est la plus favorable par rapport à un ou plusieurs critères donnés (la consommation par exemple) et un ensemble de

contraintes. Il est donc naturel d'intégrer cette possibilité dans l'analyse des apports de la propulsion éolienne.

L'optimisation de route est utilisée communément par les concurrents de course au large en voilier. Dans ce cas, l'objectif est de minimiser le temps sur parcours.

Dans le cadre du routage de navires de commerce en propulsion mixte, la problématique est différente : le temps de parcours est fixé par les impératifs commerciaux mais la vitesse peut être modulée pour minimiser un critère à optimiser qui n'est plus le temps de parcours mais selon les projets, la consommation, les émissions de gaz polluants ou à effet de serre, le coût, etc.... Les algorithmes traditionnellement utilisés pour le routage des voiliers n'étant plus adaptés, nous avons développé un algorithme spécifique, applicable à la propulsion mixte et plus généralement à l'optimisation de route multicritères..

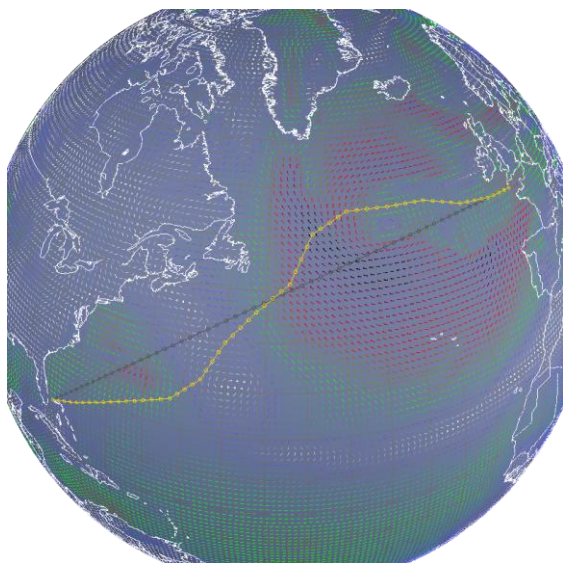


Figure 12 : Exemple de résultat de routage en propulsion mixte.

Comme on le verra plus loin, l'apport de la propulsion éolienne auxiliaire peut doubler si l'on suppose que le navire emprunte les routes optimales. Pour en tenir compte, l'apport moyen de la propulsion éolienne est déterminé en simulant une collection de voyages effectués sur les routes optimales correspondant à des conditions météorologiques réelles.

5. ETUDE DE CAS

Le cas présenté ici utilise certains résultats partiels et provisoires qui ont été obtenus dans le cadre du projet ULYSSES sur la réduction des émissions de gaz à effet de serre pour les navires de charge. Ce programme est toujours en cours et il fera l'objet de communications spécifiques de la part des partenaires.

Le programme ULYSSES

Le thème du programme est la réduction de la vitesse de service (slow steaming) des tankers et des vraquiers. Le slow steaming permet de réduire la consommation de carburant fossile et la quantité d'émissions de GES.

Le programme ULYSSES a pour objectifs :

- L'évaluation de l'impact du slow steaming sur l'environnement (carburant fossile, émission GES) et sur la rentabilité économique.
- L'études de plusieurs voies d'amélioration des navires (retrofitting et nouveaux navires) utilisés en slow steaming.

Le programme a réuni un ensemble de partenaires dont les compétences couvrent les thèmes du projet :

- Motorisation et propulsion
- Résistance à l'avancement, tenue à la mer, manœuvrabilité
- Structure
- Réglementation et sécurité maritime
- Aérodynamique numérique et expérimentale
- Propulsion éolienne
- Optimisation de route
- Armement, affrètement

L'évaluation effectuée dans le cadre d'ULYSSES prend en compte :

- la nécessité de conserver le flux de marchandise et les conséquences sur les coûts d'investissement et d'exploitation (immobilisation navire et cargaison, frais d'équipage, ..)
- l'efficacité des propulsion existantes à basse vitesse et les progrès potentiels.

ATMA 2014

- les problèmes de manœuvrabilité et de sécurité par gros temps

Cette évaluation a été réalisée successivement pour :

- Six tankers représentatifs (estimations seulement)
- REF : un tanker existant, le TORM LILLY de type HANDYMAX
- Projet 2020 : un tanker de même capacité dont les formes et la propulsion ont été améliorées pour le slow steaming à l'aide des technologies disponibles à court terme.
- Projet 2050 : un tanker « concept » bénéficiant d'un ensemble d'innovations en cours de développement chez les partenaires et ailleurs, au niveau de l'architecture générale et de la propulsion-motorisation.

REF possède les caractéristiques suivantes :

Type	Tanker Handymax
Dimensions	183m x 32m
Emport (dwt)	53 000 t
Vitesse de service	15 nœuds



Figure 13 : Le TORM LILLY

Les évaluations de REF et des ses évolutions ont été effectuées pour une propulsion 100% fuel mais aussi pour une propulsion mixte fuel-éolienne. La propulsion éolienne a aussi été évaluée à chaque phase du programme, pour trois types de propulseurs :

- propulseur aspiré (CRAIN)

- rotor Flettner (SSPA& Chalmers Univ)
- cerf-volant dynamique (CRAIN&SSPA)

Les problématiques de sécurité liées à la propulsion éolienne, notamment la stabilité et la manœuvrabilité, ont été aussi abordées.

Les propulsions éoliennes ont été dimensionnées pour respecter les contraintes d'encombrement et de sécurité à la mer et pour constituer un bon compromis entre la rentabilité environnementale et la rentabilité financière.

Les évaluations ont été effectuées pour un trajet Rotterdam – La Nouvelle Orléans avec aller pleine charge et retour ballasté. Elles sont basées sur des données météorologiques historiques des dix dernières années qui ont été fournies par le centre européen de prédiction météorologiques à moyen terme (ECMWF). Cette méthode permet d'utiliser des données météorologiques réelles et s'oppose à une autre approche qui consisterait à utiliser des données statistiques sur le parcours choisi. Ce choix permet de respecter la structure et l'enchaînement des phénomènes météorologiques ; les données sont ensuite moyennées sur l'ensemble des parcours simulés.

Les prévisions de la consommation de la propulsion par hélice ont été réalisées sur la base d'essais en bassin et de simulations au SSPA utilisant le code SEAMAN complétés par des mesures prises sur le navire existant TORM LILLY par Wartsila. Ces simulations prennent en compte la houle et le fardage du navire. Les rendements des motorisations thermiques ont été étudiés par Wartsila, TNO et Newcastle Univ. Le modèle de coût global a été étudié par Bureau Veritas et Germanischer Lloyd.

Dans ce modèle, le prix du fuel est un paramètre déterminant. Le projet ULYSSES a sélectionné trois scénarios de prix :

	Prix du fuel marine	
Haut	1275 USD/t	Prévision haute 2050

ATMA 2014

Moyen	898 USD/t	Prévision basse 2050 Probable avant 2020 (*)
Bas	520 USD/t	2013

Tableau 2: Scénarios pour le prix du fuel

(*) ce niveau de prix correspond au remplacement total, prévu dès 2020, du fioul lourd IFO par le fioul distillé MGO.

Slow steaming en propulsion 100% fuel

Les éléments fournis dans cette section sont donnés à titre indicatif et ne doivent pas être considérés comme les résultats définitifs du programme ULYSSES qui est encore en cours.

La structure du coût global pour une distance et un chargement donnés, en fonction de la vitesse moyenne, est décrite sur la Figure 14 (dans cet exemple il s'agit d'un résultat intermédiaire pour le navire REF en charge pour un trajet de 3000 nm et un prix de fuel Moyen).

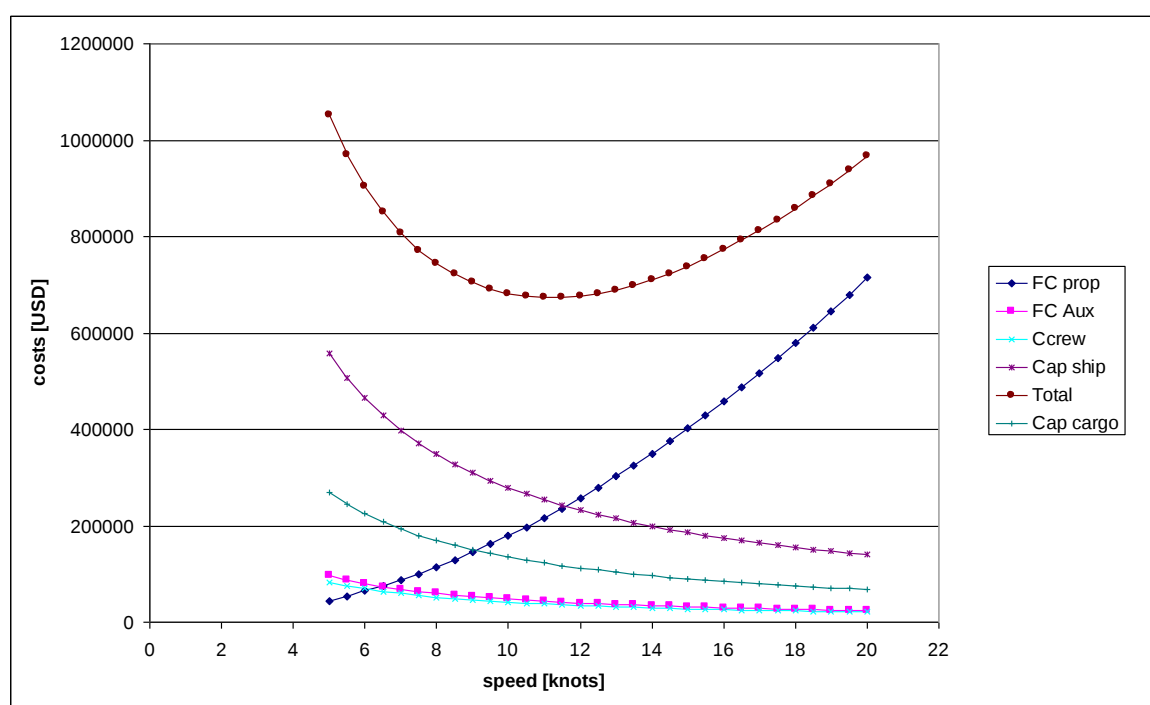


Figure 14: Répartition des coûts en fonction de la vitesse moyenne et optimum économique (origine ULYSSES, Bureau Veritas)

FC prop : consommation de fuel de la propulsion

FC Aux : consommation de fuel des auxiliaires

Ccrew : coût d'équipage

Cap ship : coût d'amortissement du navire

Cap cargo : coût d'immobilisation du chargement

D'après cet exemple, la vitesse moyenne la plus économique est proche de 11 nœuds pour une vitesse de service actuelle de 15 nœuds.

Le Tableau 3 donne les vitesses optimales obtenues pour les différents cas de charge et prix de fuel.

	V_{opt} prix fuel haut	V_{opt} prix fuel moyen	V_{opt} prix fuel bas
Ballasté	9 nds	10 nds	12 nds
Chargé	10.5 nds	11.5 nds	14 nds

Tableau 3 : Vitesse moyenne économiquement optimale selon le prix du fuel

ATMA 2014

Ces résultats, dont la tendance se répète sur des tankers de caractéristiques différentes, démontrent qu'il faut se placer dans la perspective d'une diminution de la vitesse moyenne.

Evaluation de la propulsion éolienne "aspirée"

Nous présentons des résultats pour le navire REF avec la configuration de propulsion éolienne suivante :

Type de propulseurs	Ailes aspirées développement CRAIN
Nombre de propulseurs	4
Hauteur d'un propulseur	24m
Surface d'un propulseur	96 m ²

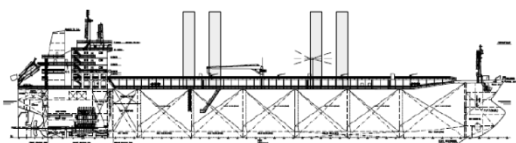


Figure 15 : Profil du pétrolier TORM LILLY équipé de quatre ailes aspirées

Economie d'énergie fossile

Comme indiqué plus haut, le calcul des économies sur la consommation de fuel de la propulsion est établi sur le trajet Rotterdam-Nouvelle Orléans aller et retour.

Les calculs sont effectués :

- sur la route directe
- sur des routes optimisant la consommation de fuel par rapport aux conditions météo relevées pendant dix ans.
- pour des vitesses moyennes de 8 nœuds, 10 nœuds et 12 nœuds

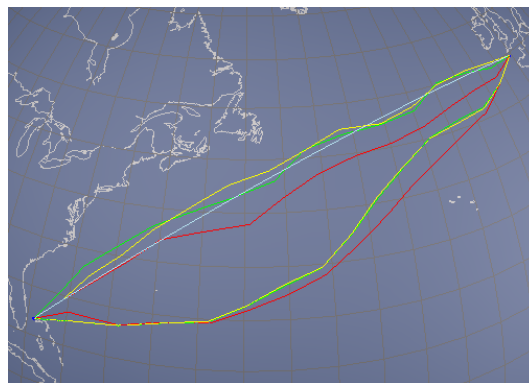


Figure 16 : Exemple de routes aller et retour optimisées (avec propulsion éolienne auxiliaire)

Le Tableau 3 fournit les économies nettes de consommations de fuel par rapport à un fonctionnement sans propulsion éolienne auxiliaire :

Vitesse moyenne (nds)	8	10	12
Route directe	20%	14%	7%
Route optimisée	33%	26%	12%

Tableau 4: % de la consommation de fuel de la propulsion économisé grâce à l'usage de la propulsion éolienne

La consommation journalière moyenne de fuel dans les différentes configurations est donnée par le Tableau 5:

Vitesse moyenne (nœuds)	8	10	12
Sans propulsion éolienne, route directe	8,6 t/j	14,9 t/j	23,3 t/j
Avec propulsion éolienne sur la route optimisée	5,7 t/j	11,1 t/j	20 t/j
Economie de fuel	2,9 t/j	3,8 t/j	3,3 t/j

Tableau 5: Consommation de fuel de la propulsion par jour

Remarques :

- l'économie de fuel varie en valeur absolue en fonction de la vitesse moyenne avec un maximum vers 10 nœuds. Cela est dû principalement aux différences d'angle et de vitesse du vent apparent moyen.

- L'optimisation de route a un effet significatif. Il convient cependant de pondérer cet effet dans le cadre d'une exploitation réelle car une optimisation parfaite supposerait de prévoir les conditions météo sur deux à trois semaines selon les vitesses. D'autre part, l'optimisation de route est aussi applicable à la navigation sans propulseur éolien compte tenu de l'effet important de la houle et du fardage pour ce type de navire. L'apport de l'optimisation sans propulsion éolienne est donnée dans le Tableau 6.

Vitesse moyenne (nœuds)	8	10	12
Economie	12%	11%	5%

Tableau 6 : % de la consommation de fuel de la propulsion économisé en optimisant la route sans propulsion éolienne

- Bien qu'elle soit comptabilisée dans le calcul d'économie d'énergie, la quantité de fuel consommée par les propulseurs éoliens est une information intéressante (Tableau 7).

Vitesse moyenne (nœuds)	8	10	12
Consommation de la propulsion éolienne	2%	1,3%	0,8%

Tableau 7: % de la consommation totale de la propulsion consommé par la propulsion éolienne

En moyenne l'énergie consommée par la propulsion éolienne représente 20% de l'énergie propulsive restituée par celle-ci. On a donc un facteur d'amplification moyen, calculé par l'équation (2), de 5.

Eléments de rentabilité financière

La quantité de journée de navigation par an est calculée en fonction de la vitesse moyenne en réservant 4 journées d'escale par rotation ce qui fournit la quantité nette de fuel économisée grâce à la propulsion éolienne. L'efficacité du routage est prise en compte par un coefficient d'efficacité égal à 0.7 :

Vitesse moyenne	8 nds	10 nds	12 nds
Economie de fuel	792 t/an	1055 t/an	735 t/an

Tableau 8: Economie annuelle de fuel grâce à la propulsion éolienne

Nous avons calculé, pour le propulseur que nous avons étudié, son coût d'acquisition ainsi que les différents coûts annexes :

- modification du navire (navire existant)
- transport des propulseurs
- installation des propulseurs
- maintenance
- frais financiers
- frais d'optimisation de route

Le coût de la propulsion éolienne dépendant de paramètres variables tels que le niveau d'industrialisation, la durée de vie effective, les coûts financiers..., nous avons retenu un coût se situant entre 350 k\$ et 600 k\$ par an.

La rentabilité de la propulsion peut être alors représentée par le graphique de la Figure 17. Le coût annuel de la propulsion éolienne est situé dans le rectangle vert, ce qui signifie que le système est rentable lorsque la courbe des économies de fuel se situe au-dessus de la ligne de coût annuel.

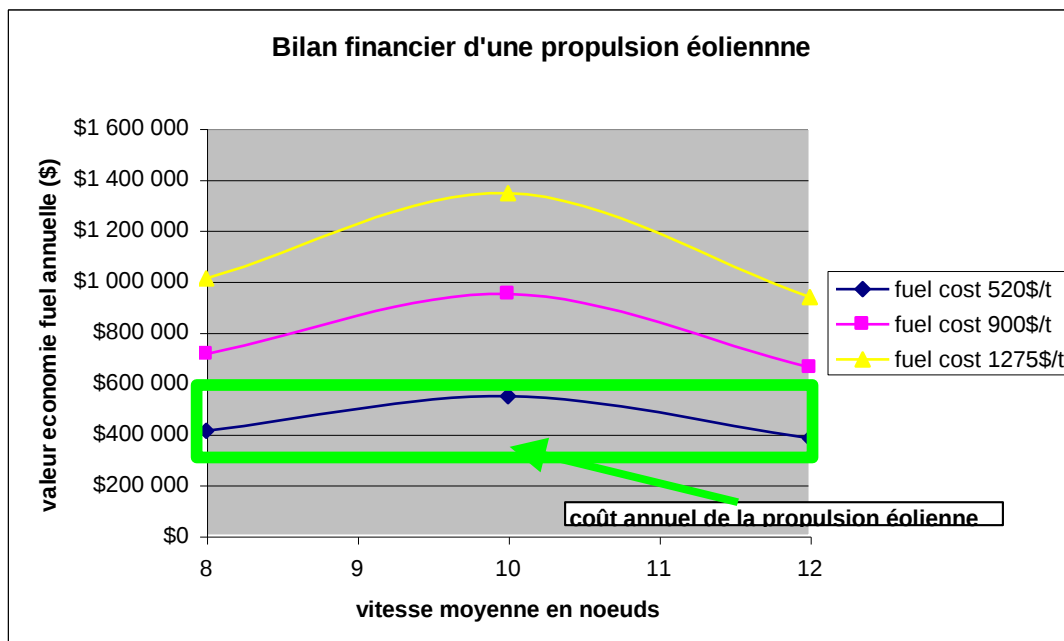


Figure 17: Bilan financier d'une propulsion éolienne

On déduit de ce graphique que :

- la propulsion éolienne considérée pourrait déjà être rentable avec le prix de fuel actuel (600\$/t).
- la propulsion éolienne considérée est nettement plus attractive quand elle est associée au slow steaming à la vitesse moyenne optimale de 10 nœuds.
- La propulsion éolienne sera significativement rentable avant 2020 avec le remplacement progressif du fioul lourd par le fioul distillé MGO.

6. CONCLUSIONS

Dans cet article nous avons décrit des propriétés, une méthodologie et des outils permettant d'analyser l'intérêt énergétique et économique de la propulsion éolienne auxiliaire des navires de charge. Nous avons fournis les résultats de cette analyse pour un cas représentatif.

Nous avons décrit les propriétés aérodynamiques comparées de plusieurs types de propulseurs sur la base de résultats numériques et expérimentaux.

Nous avons présenté un outil numérique permettant d'obtenir, dans chaque condition de vent et de mer, les apports en propulsion ainsi que les gains énergétiques pour un navire à propulsion mixte. Cet outil permet aussi d'analyser l'impact de la propulsion éolienne

sur l'hydrodynamique du navire et sur sa motorisation thermique. Il fournit des points de fonctionnement optimaux en terme de consommation. Ces résultats sont utilisables dans le cadre de l'optimisation de route.

Pour le cas précis du propulseur de type « aspiré » que nous avons étudié, nous avons montré à l'aide de ces outils que la propulsion éolienne auxiliaire permet de réduire significativement la consommation moyenne de fuel et donc les émissions de GES d'un tanker opérant sur une route commerciale. L'impact de la vitesse moyenne et l'optimisation de route sur la consommation de fuel ont été mises en évidence,

La rentabilité financière de la propulsion éolienne a été analysée en prenant en compte, dans le cas du propulseur éolien aspiré que nous avons étudié, l'ensemble de ses coûts et leur variabilité. Il ressort de cette analyse que l'on pourrait dès aujourd'hui tirer des bénéfices économiques de la propulsion éolienne et ceci avec un propulseur acceptable pratiquement. La rentabilité ne pourra que s'accroître dans le futur avec la hausse du prix du fuel et l'industrialisation des propulseurs.

La propulsion éolienne auxiliaire apparaît donc comme une méthode permettant de réduire significativement les émissions de GES du commerce maritime. Elle est applicable en pratique à des navires existants, avec une

ATMA 2014

rentabilité économique qui ne peut que s'améliorer.

Sa mise en œuvre nécessite d'utiliser des propulseurs éoliens appropriés dont l'apport énergétique et la rentabilité économique peuvent être prévus en utilisant la méthodologie que nous avons décrite.

7. REFERENCES

- [1] European Environment Agency – Trends and projections in Europe 2013 - Tracking progress towards Europe's climate and energy targets until 2020 – EEA Report No 10/2013
- [2] L. Malavard - Un nouveau propulseur éolien de navire - Comptes rendus de l'académie des sciences, Tome 1, n°1, 1984
- [3] B. Charrier - Etude théorique et expérimentale de l'effet "Magnus" destiné à la propulsion éolienne de navires - Thèse de Doctorat - Université de Paris VI - 1979
- [4] G.M.Dadd, A. Hudson and R.A.Shenoi - Comparison of two Kite Force Models with Experiment. - Journal of Aircraft, Vol 47, n°1, Jan-Feb 2010.
- [5] www.skysails.com
- [6] www.ultraslowships.com

ATMA 2014

Garanties apportées par le(s) auteur(s)

- Le mémoire soumis à l'ATMA est original et a été écrit par le(s) auteur(s) indiqué(s).
- Le mémoire ne contient aucune information violant les droits personnels ou les droits de propriété intellectuelle de n'importe quelle personne ou entité.
- Le mémoire a été rédigé avec l'autorisation écrite des détenteurs de droits de propriété intellectuelle pour tous les extraits d'œuvres protégés par les droits d'auteur qui sont inclus dans le mémoire et mention a été faite de toutes les sources utilisées.

Si l'article est rédigé en commun avec d'autres auteurs, confirmation est donnée que tous les co-auteurs ont pris connaissance des présentes garanties apportées par les auteurs.