



15^{ÈMES} JOURNÉES DE L'HYDRODYNAMIQUE

22 - 24 novembre 2016 - Brest

Simulation de voyage au long cours pour le calcul d'économies de carburant : application à la propulsion par cerf-volant

"Voyage simulation for fuel economy assessment: practical application to kite auxiliary propulsion for merchant ship"

V. Podeur^{1*}, D. Merdrignac², M. Behrel¹, K. Roncin¹, C. Fonti⁴, C. Jochum¹, Y. Parlier³, P. Renaud⁴

¹ENSTA Bretagne, FRE CNRS 3744, IRDL, F – 29200 Brest, France

²Ecole centrale de Nantes, 1 Rue de la Noë, 44300 Nantes

³Beyond the sea, 1010 avenue de l'Europe, 33260 La Teste de Buch, France

⁴CMA CGM, 4, quai d'Arenc 13235 Marseille cedex 02 France

*Contact (vincent.podeur@ensta-bretagne.org)

Mots clés : *Propulsion éolienne, économies de carburant, simulation temporelle*

Résumé

Un outil dédié à l'évaluation des économies de carburant faites par cerf-volant a été développé. Pour être fiables les calculs doivent porter sur des périodes longues de plusieurs années, sur différentes routes et différents navires. L'outil développé est donc rapide, multi-routes et multi-navires. Afin d'appréhender au mieux les effets de l'alternance des phénomènes météorologiques sur l'opérabilité du système, une approche temporelle a été retenue. Celle-ci se base sur l'utilisation d'une base de données mise à disposition par l'ECMWF¹. Les performances du système de propulsion par cerf-volant peuvent être évaluées dans deux conditions de navigation différentes qui sont à vitesse constante ou à puissance constante et ce pour une surface d'aile souhaitée. Une validation a été réalisée et montre que la consommation du navire prédite par le programme est proche de celle mesurée en mer. Elle montre une sous-estimation de 12% sur la consommation moyenne, principalement liée au fait que les consommations auxiliaires et la résistance ajoutée dans les vagues ne sont pas prises en compte. In fine, un cas d'étude est présenté pour un porte-conteneurs de 2200 EVP et une aile de 800m² sur une route transatlantique reliant Halifax au Havre. Les résultats montrent sur une période simulée de 5 ans, une économie globale de 12.1% pour une vitesse de 16 nœuds et 6.7% pour une vitesse de 19 nœuds.

Abstract

A tool dedicated to assess economy induced by kite propulsion has been developed. To produce reliable results, computations must be done on several years periods, for several routes and for several ships. Thus, the presented tool is fast, multi-routes and multi-ships. In order to accurately represent the impact of meteorological event patterns, a temporal approach of the problem has been used. This tool makes use of a weather database provided by the ECMWF¹. Two sailing conditions can be selected for assessing the performance of the kite system. For a given kite area, the simulation can be run either at constant speed or constant engine power. A validation has been made, showing that predicted consumption is close from in-situ measurement. It shows an underestimation of 12% of the mean fuel consumption mainly due to the neglect of the reefers consumption and the waves added resistance. To conclude, a case study is led with a 2200 TEU container ship and a 800m² kite on a transatlantic route between Halifax and Le Havre. Over a 5 year simulated period, results show that a total economy of 12.1% can be made at a speed of 16 knots and 6.7% at a speed of 19 knots.

¹ [European Center for Medium range Weather Forecast](http://www.ecmwf.int/)

1 Introduction

L'engouement pour la propulsion éolienne, motivé par les problématiques environnementales et économiques, a grandement stimulé l'innovation dans ce domaine ces dernières années. De très nombreuses études ont donc portées sur l'évaluation des performances des différentes technologies ([1], [2], [3], [4], [5]).

L'une des approches classiques, dérivée du monde de la course au large, est de développer un programme de prédiction de performance souvent nommé Velocity Prediction Program (VPP). Se fondant sur cette approche, P. Naaijen et V. Koster [6] ont établi des polaires des performances de traction du cerf-volant et les pourcentages d'économies potentielles en carburant, en fonction de la vitesse du navire et des conditions de vent pour un tanker d'un déplacement de 50 000 DWT et un cerf-volant de 320 m². De tels résultats permettent la comparaison entre différents systèmes de traction auxiliaire, mais ont le défaut de négliger l'impact des limitations opérationnelles sur l'économie effective de carburant. Comme suggéré par P. Naaijen, les performances du système étudié dépendent grandement de la route maritime considérée.

Cela souligne la nécessité d'adopter une approche complémentaire, impliquant l'utilisation de données météorologiques. Afin de quantifier l'impact de l'alternance des phénomènes météorologiques rencontrés par le navire sur l'opérabilité du système, le choix d'une approche temporelle semble le plus adapté.

De tels travaux ont déjà été réalisés par R.P Dallinga [7], mettant en œuvre un programme spécialement développé pour la simulation de voyages au long cours. Cette étude se concentre essentiellement sur l'opérabilité du navire et l'impact économique de la propulsion par cerf-volant sur une route spécifique. Cependant, la modélisation de la propulsion par cerf-volant adoptée souffre d'une trop grande approximation sur le calcul de la force propulsive. La force propulsive, modélisée par une fonction analytique, ne permet pas de prendre en compte les bénéfices des différents modes de vol du cerf-volant ni l'optimisation de ses trajectoires. De plus aucune contrainte opérationnelle n'a été prise en compte, notamment en ce qui concerne le non fonctionnement du système lorsque les conditions de vent sont trop faibles ou trop fortes.

En s'appuyant sur les travaux de R. Leloup et al. [8], un outil de simulation a spécialement été développé à l'ENSTA Bretagne pour contourner les limitations exposées ci-dessus. Cet article présente les concepts fondamentaux utilisés par cet outil, une validation s'appuyant sur des mesures in-situ, ainsi qu'un cas d'étude pour un porte conteneur sur un trajet transatlantique.

Nomenclature

Définition	Symbole	unité
Angle de finesse	ϵ	[°]
Cap du navire	ψ	[rad]
Cconsommation spécifique du moteur	SFC	[kg/kWh]
Coefficient de portance	C_L	[-]
Coefficient de trainée aérodynamique longitudinale	C_x	[-]
Coefficient de trainée totale en eau calme	C_t	[-]
Coefficient Fraction de sillage	w	[-]
Coefficients polynomiaux des fonctions $f_{K_T}, f_{K_Q}, f_{SFC}$	$\alpha_{K_T i}, \alpha_{K_Q i}, \alpha_{SFC i}$	[-]
Composante horizontale selon \vec{y}_0 . du vecteur vent réel	\vec{u}_{TW}	[m/s]
Composante selon \vec{x}_0 . verticale du vecteur vent réel	\vec{v}_{TW}	[m/s]
Consommation de carburant	FC, FC_{kite}	[kg]
Couple hélice	Q, Q_{cible}	[N.m]
Couple hélice adimensionnel	K_Q	[-]
Diamètre de l'hélice	D	[m]
Direction du vent réel	β_{TW}	[rad]
Fonction de consommation spécifique	f_{SFC}	[kg/kWh]
Fonctions poussée et couple hélice adimensionnelles	f_{K_T}, f_{K_Q}	[-]
Force propulsive	T	[N]
Force propulsive du cerf-volant	F_{kite}	[N]
Longueur des lignes	l_T	[m]
Masse volumique de l'air	ρ_{air}	[kg.m ³]
Masse volumique de l'eau de mer	ρ_{water}	[kg.m ³]
Nombre d'avance	J	[-]
Poussé hélice adimensionnelle	K_T	[-]
Puissance moteur	P	[W]
Puissance moteur adimensionnelle	P_*	[-]
Résistance aérodynamique	R_A	[N]
Résistance en eau calme	R_H	[N]
Résistance totale	R_T	[N]
Surface du cerf-volant	$A_k, A_{k_{ref}}, A_{k_{cible}}$	[m ²]
Surface frontale des œuvres mortes	A_{FR}	[m ²]
Surface mouillée du navire	S_h	[m ²]
Taux de rotation hélice	n, n_{cible}	[s ⁻¹]
Vecteur vitesse du navire	\vec{V}_s	[m/s]
Vecteur vitesse du vent réel	\vec{V}_{WT}	[m/s]
Vecteur vitesse du vent relatif	\vec{V}_{WR}	[m/s]

2 Principe général du programme

Pour cette étude, l'algorithme développé est basé sur la discrétisation spatiale et temporelle des données météorologiques rencontrées sur la route maritime considérée.

La route est discrétisée en un nombre de points suffisamment nombreux, afin de permettre une représentation cohérente de l'évolution spatiale des conditions météorologiques rencontrées sur ce trajet.

Il est alors possible de lancer une simulation sur la durée souhaitée, en spécifiant l'intervalle temporel entre deux trajets. L'équilibre des forces agissant sur le navire est alors calculé pour chaque nouvelle condition météorologique rencontrée du fait de l'évolution spatiale ou bien temporelle.

Les résultats obtenus sont stockés sous la forme d'un tableau donnant l'évolution des différents paramètres calculés à chaque calcul d'équilibre des forces. Ceci permet d'évaluer le comportement du système au cours du trajet. Un récapitulatif à l'échelle du voyage est également réalisé.

3 Conventions et repères utilisés

Le navire évolue dans le repère général R_0 , avec pour origine les coordonnées 0° Nord, 0° Sud. Le vecteur \vec{x}_0 étant orienté dans la direction du Nord et le vecteur \vec{y}_0 dans la direction de l'Est. R Leloup [8] a montré que la dérive du navire pouvait être négligée en première approximation. Nous pouvons donc ne considérer que les efforts longitudinaux qui s'appliquent sur le navire. De plus, le courant est également négligé, le cap ψ et la route du navire sont donc confondus. ψ est donné par la mesure d'angle (\vec{x}_0, \vec{x}_B) .

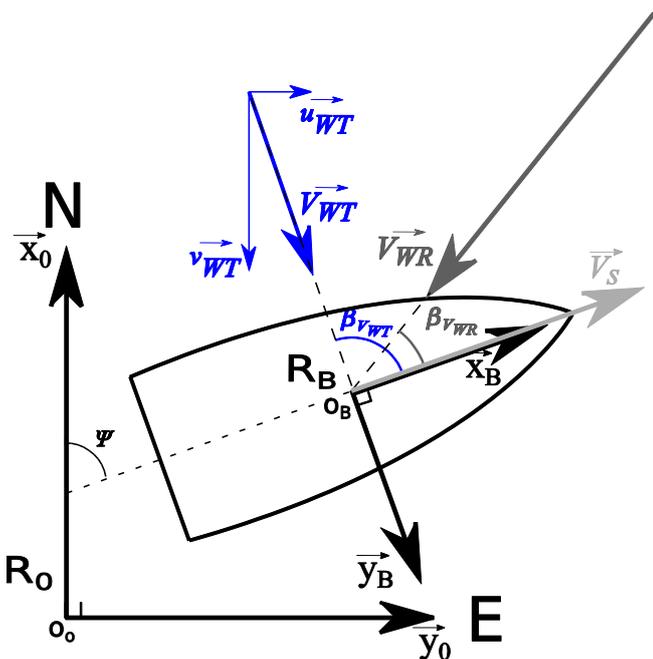


Figure 1 Définition des repères

Le repère R_B attaché au navire est centré sur la section milieu du navire. Le vecteur \vec{x}_B est sur l'axe longitudinal du navire et orienté vers la proue. Le vecteur \vec{y}_B étant orienté vers le côté tribord du navire. Puisque seuls les mouvements longitudinaux sont considérés, le vecteur vitesse \vec{V}_s du navire est toujours colinéaire au vecteur \vec{x}_B .

Les conditions de vent réel \vec{V}_{WT} rencontrées par le navire sont données par les deux composantes \vec{u}_{WT} et \vec{v}_{WT} , respectivement colinéaires avec les vecteurs \vec{y}_0 et \vec{x}_0 . L'orientation du vecteur de vent réel \vec{V}_{WT} dans le repère R_B est donnée par l'angle β_{WT} . Le vecteur vitesse du vent relatif \vec{V}_{WR} , issu de la somme des vecteurs $-\vec{V}_s$ et \vec{V}_{WT} , est orienté dans le repère R_B par l'angle β_{WR} .

4 Création de la route et modélisation du trajet

L'utilisation d'un programme dédié permet la paramétrisation de la route souhaitée. La trajectoire orthodromique est calculée entre les deux ports de la route considérée. Elle est ensuite discrétisée, et chaque point discret est déplacé au point du maillage météorologique le plus proche. Si nécessaire, des points de contrôle peuvent être spécifiés afin d'éviter les obstacles (côtes, hauts fonds, etc.) ou d'imposer un point de passage spécifique. Ceci est illustré dans la figure 2. La route rouge représente le trajet orthodromique entre les ports de Dakar et de Lagos. Cette route n'étant pas valide, deux points de contrôle, indiqués par les deux carrés noirs, ont été rajoutés manuellement. La nouvelle route, représentée par la ligne verte, est alors valide.

Pour la partie météorologique, le programme repose sur l'utilisation de la base de données ERA-Interim mise à disposition par l'ECMWF. Celle-ci couvre la surface du globe terrestre allant du cercle polaire Arctique au cercle polaire Antarctique. Sa résolution spatiale est de 0.75° et sa résolution temporelle est de 6 heures. Les données utilisées sont les suivantes :

- Composante U du vecteur vitesse V_{WT} à 10 m.
- Composante V du vecteur vitesse V_{WT} à 10 m.

La base de données ERA-Interim est une réanalyse des données à dispositions depuis 1979. Elle est issue du croisement entre les mesures in situ et satellites ainsi que l'utilisation de modèles mathématiques. Cela assure la fiabilité et la qualité des données utilisées.

La route étant définie, les données météorologiques propres à chaque point de passage sont extraites de la base de données météo. Les conditions météo étant considérées constantes sur un segment.

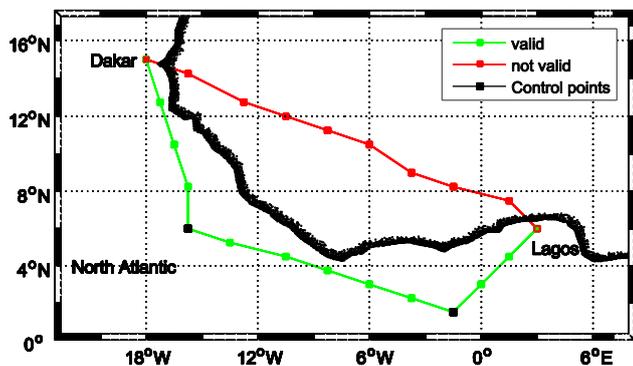


Figure 2 Création d'une route entre Dakar et Lagos

5 Modélisation du navire

La modélisation du navire se limite à l'évaluation des efforts longitudinaux. Comme décrit dans l'équation (5.1), la résistance totale du navire R_T est fonction des résistances aérodynamique R_A et hydrodynamique R_H .

$$R_T = R_H + R_A \quad (5.1)$$

Ainsi la projection sur l'axe longitudinal des efforts s'exerçant sur le navire aboutit à l'équation (5.2) en tenant compte de la force propulsive du cerf-volant F_{kite} .

$$(1 - t)T + F_{kite} = R_T \quad (5.2)$$

Le coefficient de succion $(1 - t)$ permet de prendre en compte la résistance induite par la présence de l'hélice sous la carène.

5.1 Résistance hydrodynamique

La résistance hydrodynamique considérée ne concerne que la résistance à l'avancement en eau calme R_H . La résistance ajoutée induite par les vagues incidentes est négligée pour cette première approche.

Pour ce programme, R_H est calculée à partir du coefficient de trainée total C_t , qui est fonction de la vitesse V_s du navire. R_H est donnée dans l'équation (5.3).

$$R_H = \frac{1}{2} \rho_{eau} V_s^2 S_h C_t(V_s) \quad (5.3)$$

Les données nécessaires pour ce calcul peuvent être issues de mesures faites en mer ([10], [9]) ou de mesures faites en bassins d'essais ([11]). Elles peuvent également venir de modèles paramétriques ([12]). Des données issues de simulations numériques peuvent également être utilisées. Dans l'étude présente, les données proviennent d'essais en bassin réalisé au Hyundai Maritime Research Institute.

L'objectif est d'avoir une évaluation qui soit en adéquation avec les valeurs au réel et la consommation

de carburant associée. Une sous-estimation de la résistance pour une consommation de carburant donnée peut engendrer une surestimation de la proportion de fuel économisé.

5.2 Résistance aérodynamique

La résistance aérodynamique est fonction de la vitesse du vent relatif et de sa direction ainsi que de la forme générale du navire et de ses conditions de chargement.

Comme pour la résistance hydrodynamique, seule la composante longitudinale R_A est évaluée. Cette dernière est calculée à partir du coefficient d'effort longitudinal C_x , fonction de l'angle de vent relatif β_{WR} . La résistance aérodynamique R_A est donnée par l'équation suivante (5.4).

$$R_A = -\frac{1}{2} \rho_{air} \cdot A_{FR} \cdot V_{WR}^2 \cdot C_x(\beta_{WR}) \quad (5.4)$$

La valeur du coefficient C_x peut être obtenue à l'aide des travaux de W. Blendermann [13]. Ces coefficients peuvent être également obtenus via des essais en soufflerie où par simulation numérique.

5.3 Propulsion

La modélisation de la chaîne de propulsion se fonde essentiellement sur l'utilisation des courbes en eau libre de l'hélice du navire. Connaissant les courbes $K_Q(J)$ et $K_T(J)$, sous forme de polynômes fonctions du nombre d'avance J , ainsi qu'en faisant l'approximation que le coefficient de succion $(1 - t)$ et la fraction de sillage $(1 - w)$ sont constants, il est possible d'établir une relation entre la force propulsive R_T et la puissance P délivrée par le moteur.

Cette relation peut être abordée de deux façons différentes selon que le navire soit exploité à vitesse constante ou bien à puissance constante. Une description détaillée de ces deux méthodes est donnée dans les sections 7.1 et 7.2.

6 Modélisation du cerf-volant

La modélisation de la propulsion par cerf-volant est basée sur les travaux de R. Leloup [8] sur l'optimisation de trajectoire pour la propulsion par cerf-volant. Ce programme d'optimisation permet d'obtenir la force propulsive du cerf-volant en fonction de la vitesse du navire, de la vitesse du vent réel et de sa direction dans le repère lié au navire.

Ce programme évalue la force propulsive moyenne du cerf-volant sur une trajectoire. Comme expliqué dans les travaux de R. Leloup [8], la trajectoire optimale est un compromis entre la zone de pleine puissance de la fenêtre de vol et la direction d'évolution du navire. Une description complète de la stratégie adoptée est disponible dans les travaux de R. Leloup et al. [14].

À ce programme a été intégré la prise en compte des limitations dues à la résistance structurelle du cerf-volant ainsi qu'à son poids.

Le programme d'optimisation nécessite un temps de calcul de 20 secondes pour chaque nouvelle condition météorologique, ce qui le rend inapproprié pour l'étude présentée. Afin de palier à ce problème, une base de données relative à la propulsion par cerf-volant a été réalisée pour une large étendue de vitesses de navire, de directions et de vitesses de vent réel. La discrétisation observée pour la création de la base de données est donnée dans le tableau 1. En effet, le cas d'étude, présenté en section 10, qui représente 500 trajets transatlantiques, nécessite 244 heures de calcul avec le programme d'optimisation initial contre 8 heures avec l'utilisation de la base de données. Celle-ci permet donc d'atteindre une vitesse de calcul environ 60 fois supérieure. Ce gain de vitesse rend l'utilisation de cet outil compatible avec les besoins des industriels.

Tableau 1 Discrétisation de la base de données « Cerf-volant »

Grandeur	Etendue	Résolution
β_{WT}	$0 \leq \beta_{WT} \leq 180^\circ$	5°
V_{WT}	$2 \leq V_{WT} \leq 54 \text{ nds}$	4 nds
V_s	$1 \leq V_s \leq 23 \text{ nds}$	2 nds

Cette base de données permet alors d'obtenir la force propulsive du cerf-volant en fonction des conditions de navigation par interpolation.

Les propriétés du cerf-volant considéré pour la réalisation de la base de données sont données dans le tableau 2.

Tableau 2 Propriétés du cerf-volant de référence

Surface du cerf-volant A_k	320 m^2
Coefficient de portance C_L	$0,776$
Angle de finesse ϵ	$12,2^\circ$
Longueur des lignes l_T	300 m
Poids du cerf-volant	2 kg/m^2
Charge alaire	100 kg/m^2

Compte tenu de ces propriétés et des contraintes liées à la sécurité des marins, les contraintes d'utilisation suivantes ont été appliquées lors du calcul de la base de données :

- Force verticale générée par l'aile toujours supérieure ou égale à son poids.
- Conditions de vent relatif comprises entre Beaufort 2 et Beaufort 7 ($3\text{m/s} < V_{WR} < 17\text{m/s}$) pour que le système soit utilisable.

- tension maximale acceptable dans les lignes de traction en accord avec la charge alaire maximale admissible (cf. tableau 2).

Afin d'adapter la base de données en fonction de la superficie souhaitée $A_{k_{cible}}$ de l'aile, les propriétés aérodynamiques sont considérées constantes. La force propulsive devient donc directement proportionnelle à la superficie de l'aile souhaitée. La base de données établie pour une aile de référence $A_{k_{ref}}$ de 320m^2 peut donc être modifiée en multipliant les forces propulsives par un coefficient de correction G donné par la formule (6.1).

$$G = \frac{A_{k_{cible}}}{A_{k_{ref}}} \quad (6.1)$$

7 Equilibre des forces

La modélisation permettant de choisir deux types de scénarios. Le premier à vitesse de navire constante et le second à puissance moteur constante. Deux stratégies de résolution ont donc été associées à l'équation de l'équilibre des forces (5.2). La figure 3 illustre les deux types de scénarios. Partant du point 1 qui indique l'équilibre initial, le scénario « Puissance constante » entraîne un déplacement du point d'équilibre vers le point 3 lorsque la force propulsive du cerf-volant augmente. Cela induit une augmentation de la vitesse du navire. Pour le scénario « Vitesse constante » le point d'équilibre se déplace vers le point 2. La puissance des machines sera alors diminuée pour maintenir la vitesse cible.

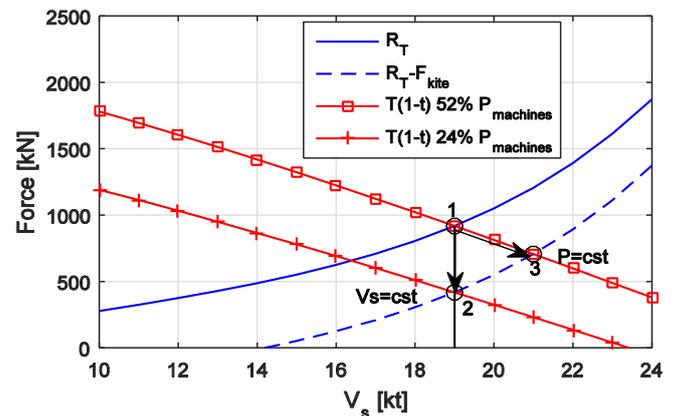


Figure 3 Equilibre des forces de résistance à l'avancement et de propulsion délivrée par l'hélice.

Connaissant la force propulsive délivrée par l'hélice ainsi que le rendement de la chaîne propulsive et la loi régissant la consommation spécifique du moteur, la consommation du navire pour des conditions de navigation données, peut être calculée.

7.1 Vitesse constante

Pour une vitesse constante V_s souhaitée, la résistance totale R_T et donc la force propulsive T sont évaluées à l'aide des équations (5.1) et (5.2).

On peut alors établir la fonction $f_{K_T\text{cible}}(n)$, avec n le taux de rotation du moteur. Cette fonction est donnée par l'équation (7.1).

$$f_{K_T\text{cible}}(n) = \frac{T}{\rho_{eau} n^2 D^4} \quad (7.1)$$

Connaissant les propriétés hydrodynamiques en eau libre de l'hélice du navire, on peut exprimer la fonction $f_{K_T}(J)$ représentée sous la forme d'un polynôme en fonction de J . Ce polynôme est exprimé dans l'équation (7.2).

$$f_{K_T}(J) = \sum_{i=0}^I \alpha_{K_T i} J^i \quad (7.2)$$

Or le nombre d'avance J , donné par l'équation (7.3), peut être considéré comme une fonction de n car la vitesse V_s du navire est constante.

$$J(n) = \frac{V_s(1-w)}{nD} \quad (7.3)$$

La fonction $f_{K_T}(J)$ peut donc être réécrite sous la forme d'une fonction de n seulement. On cherche alors la solution de l'équation suivante :

$$f_{K_T}(n) - f_{K_T\text{cible}}(n) = 0 \quad (7.4)$$

La solution de l'équation (7.4) est n_{res} , le taux de rotation de l'hélice pour l'équilibre considéré. La fonction $f_{K_Q}(J)$ également représentée sous la forme d'un polynôme de J tel qu'exprimé dans l'équation (7.5) peut donc être réécrite comme une fonction de n .

$$f_{K_Q}(J) = \sum_{i=0}^I \alpha_{K_Q i} J^i \quad (7.5)$$

Connaissant V_s et n_{res} , il est possible d'obtenir la valeur de $K_{Q\text{cible}}$. La relation entre cette grandeur et le couple délivré par le moteur est donnée dans l'équation (7.6).

$$Q_{cible} = K_{Q\text{cible}} \rho_{eau} n_{res}^2 D^5 \quad (7.6)$$

Connaissant le couple Q_{cible} délivré par le moteur, la puissance qui lui est associée peut être obtenue par l'équation (7.7).

$$P = 2\pi n_{res} Q_{cible} \quad (7.7)$$

La puissance P_{cible} , la vitesse V_s et le taux de rotation moteur n_{cible} calculés, permettent alors d'évaluer la consommation de carburant du navire. Une description de la méthode de calcul est donnée dans la section 8.

7.2 Puissance constante

Pour une puissance constante P , on cherche à évaluer la vitesse atteinte avec l'aide d'un cerf-volant en fonction des conditions de navigation.

En considérant les fonctions $f_T(V_s)$, $f_{F_{kite}}(V_s)$, $f_{R_H}(V_s)$ et $f_{R_A}(V_s)$, l'équation (5.2) peut être réécrite tel que dans l'équation (7.8).

$$f_T(V_s) + \frac{f_{F_{kite}}(V_s) - f_{R_H}(V_s) - f_{R_A}(V_s)}{1-t} = 0 \quad (7.8)$$

La solution de cette équation étant la vitesse obtenue pour la puissance choisie. Pour trouver cette solution, il faut donc déterminer les 4 fonctions $f_T(V_s)$, $f_{F_{kite}}(V_s)$, $f_{R_H}(V_s)$ et $f_{R_A}(V_s)$.

La première fonction à déterminer est $f_T(V_s)$. Connaissant les relations entre la puissance P et le couple Q du moteur ainsi que la courbe K_Q de l'hélice, on peut écrire la relation suivante :

$$K_Q = \frac{P}{2\pi n \rho_{eau} n^2 D^5} \quad (7.9)$$

Comme pour la fonction f_{K_T} à la section précédente la fonction f_{K_Q} peut être exprimée comme étant une fonction de n seulement lorsque V_s est considérée constante.

On peut alors poser l'équation (7.10), dont la solution donne le taux de rotation n_{res} correspondant au couple P_{cst} et V_s initialement établi.

$$K_Q - f_{K_Q}(n) = 0 \quad (7.10)$$

Cette résolution est effectuée pour un nombre I de vitesse, allant de 1 nds à la vitesse maximale $V_{s\text{max}}$ du navire. On a alors I couples V_{s_i}, n_i pour une puissance constante P . Connaissant la fonction $K_T(J)$ donnée dans l'équation (7.2) et la relation donnée dans l'équation (7.1), on peut alors poser l'équation (7.11) qui donne les I valeurs de poussée de l'hélice correspondantes aux I couples (n, V_s) .

$$T_i = f_{K_T}(J(n_i, V_{s_i})) \rho_{eau} n_i^2 D^4 \quad (7.11)$$

Ces I valeurs sont alors utilisées pour évaluer la fonction $f_T(V_s)$ via régression polynomiale. Cette étape est illustrée par la figure 4 où les I valeurs et les de T_i et n_i sont représentées.

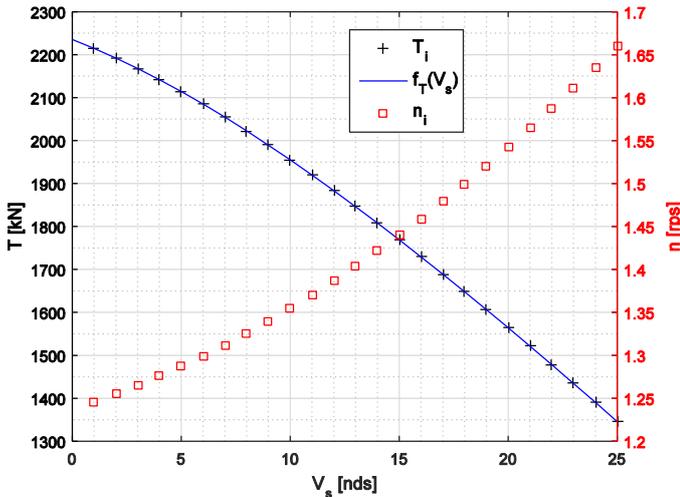


Figure 4 Régression polynomiale de $f_T(V_s)$ sur les I valeurs de T_i

Une approche similaire est adoptée pour les 3 autres fonctions $f_{R_T}(V_s)$, $f_{R_H}(V_s)$ et $f_{R_A}(V_s)$. Pour la fonction $f_{R_A}(V_s)$, la résistance aérodynamique peut être exprimée en fonction de la vitesse du navire si les conditions de vent réel (β_{WT}, V_{WT}) sont considérées constantes. Concernant la fonction $f_{F_{kite}}(V_s)$, la base de données est établie en fonction des trois grandeurs β_{WT}, V_{WT} et V_s , ce qui permet de réaliser directement la régression polynomiale sur les données considérées.

8 Economies de carburant

Le calcul de la consommation de carburant FC se base sur les travaux de R. Leloup [8] et P. Naaijen [6].

La consommation du navire est directement dépendante du temps de navigation et de la puissance développée par les moteurs. Cette relation est donnée dans l'équation (8.1).

$$FC = SFC \times t \times P \quad (8.1)$$

Le SFC correspondant à la consommation spécifique en carburant du moteur.

Cette consommation spécifique n'est pas fixe et varie avec le point de fonctionnement du moteur. Elle est minimale aux alentours de 80% de la puissance maximale des machines. La figure 5 donne l'évolution classique du SFC en fonction de la puissance adimensionnée P_* délivrée. L'adimensionnalisation est effectuée avec la valeur de la puissance maximale du moteur. La fonction $f_{SFC}(P_*)$, donnant le SFC en fonction de la puissance normalisée est obtenue par régression polynomiale sur le jeu de données expérimentales. La fonction f_{SFC} est donc exprimée

sous la forme d'un polynôme tel que dans l'équation (8.2).

$$f_{SFC}(P_*) = \sum_{i=0}^I \alpha_{SFC_i} P_*^i \quad (8.2)$$

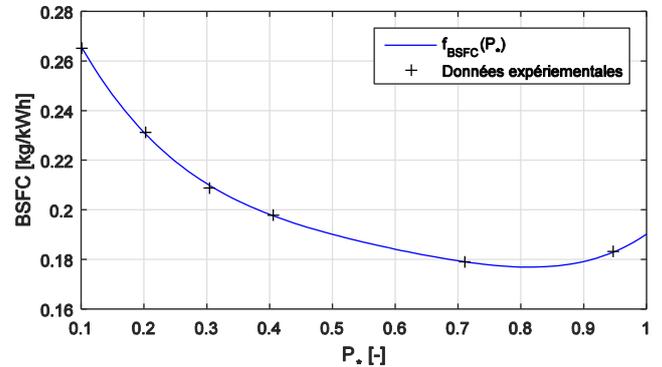


Figure 5 Variation du SFC en fonction de la puissance moteur normalisée

Connaissant alors la consommation de carburant FC du navire, l'économie réalisée par le système de propulsion par cerf-volant peut être évaluée par l'équation (8.3). Le pourcentage d'économie $\%_{eco}$ correspond au pourcentage de carburant économisé par rapport à une consommation sans cerf-volant FC . FC et FC_{kite} correspondant aux consommations avec et sans cerf-volant sur un trajet complet.

$$\%_{eco} = \frac{FC - FC_{kite}}{FC} \quad (8.3)$$

9 Validation

Le calcul présenté ici est réalisé sans cerf-volant, afin d'évaluer la pertinence du calcul de la consommation de carburant.

Cette validation se base sur l'utilisation de mesures réalisées à bord de porte-conteneurs de 2200 EVP. Pour ce type de navire, la stratégie à vitesse constante vue à la section 7.1 est la mieux adaptée. La base de données de mesures couvrent une période de 3,5 ans sur la ligne Montoir-de-Bretagne / Pointe-à-Pitre. Les mesures concernant les informations essentielles telles que la vitesse du navire, les conditions météorologiques et la consommation sur 24 heures.

Les caractéristiques de ce navire sont données dans le tableau 9.

La route exploitée est donnée sur la figure 6. Les marques de couleur bleue représentent différentes positions des navires durant leur transit. La route en rouge correspond aux coordonnées utilisées pour les simulations.

Tableau 3 Caractéristiques du navire

Navire : Porte-conteneurs classe Fort, 2200 EVP	
LOA	197.2 m
LPP	187.6 m
LWL	187.6 m
B	30.2 m
T	11.0 m
∇	41767 m ³
Lateral projected wind area A_{LR}	4314 m ²
Frontal projected wind area A_{FR}	779 m ²
hélice	
Diamètre D	7.79 m
Expanded blade area ratio A_E/A_0	1.031
Pitch-diameter ratio P/D	1.085

résistance totale. La faiblesse des écarts entre les simulations et les valeurs mesurées au réel nous confirme la cohérence de notre modèle vis-à-vis de l'objectif recherché.

10 Cas d'étude

Afin de quantifier les économies de carburant pouvant être réalisées à l'aide d'un système de propulsion auxiliaire par cerf-volant, un cas d'étude sur une route commerciale existante est sélectionné.

Les données utilisées dans le cadre de cette étude sont les suivantes :

- **Le navire** : un porte-conteneur de 2200 EVP (caractéristiques dans le tableau 9).
- **Le cerf-volant** : $A_k: 800m^2$, $C_L: 0.776$, $\epsilon: 12.02^\circ$, $l_T: 300m$.
- **La route** : basée sur une ligne maritime existante reliant les ports du nord de l'Europe aux ports de Halifax et Montréal au Canada. Celle-ci est donnée dans la figure 7.

La condition de navigation considérée est celle à vitesse constante. Deux vitesses de croisière de 16 et 19 nœuds sont étudiées. Le nombre de trajets aller/retour évalués est de 125 pour chaque vitesse ce qui représente un total de 500 trajets évalués. Ils sont espacés d'un intervalle de 15 jours et réparties sur une période de 5 ans à partir du 1 janvier 2010.

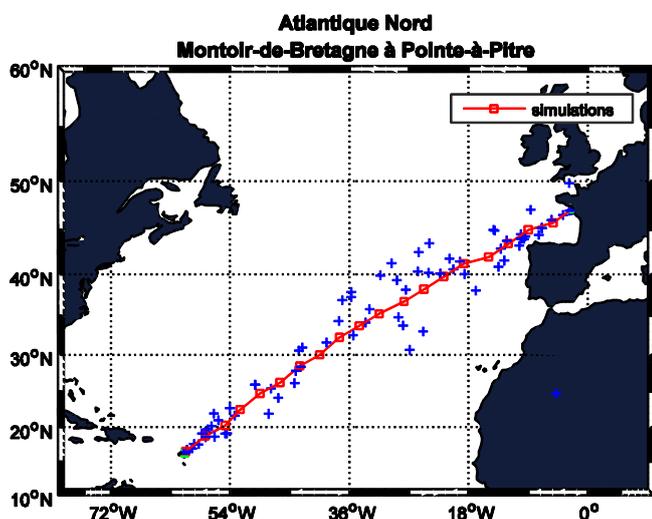


Figure 6 Trajet Montoir de Bretagne à Pointe à Pitre

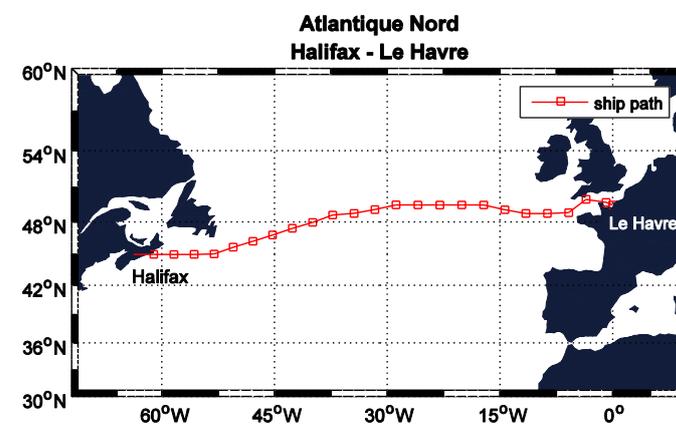


Figure 7 Trajet Halifax au Havre

La simulation a été réalisée sur la même période de temps que celle des mesures, entre le 1^{er} janvier 2011 et le 26 juin 2014. 94 aller/retour espacés d'un intervalle de 15 jours sont répartis sur la période considérée. Le mode de navigation choisi est celui à vitesse constante. Cette vitesse est basée sur la vitesse moyenne de navigation mesurée en mer. Les résultats de la simulation sont donnés dans le tableau 4.

Tableau 4 Résultats de la simulation MTX – PP

Porte-conteneurs 2200-EVP	Simulation	Simulation corrigée (+auxiliaires)	Mesures
\bar{V}_s	19.13 nœuds		
$\bar{FC} / 24h$ (sans cerf-volant)	56.5 t	65.7 t	64.1 t

10.1 Trajet Le Havre →Halifax

Le tableau 5 donne un récapitulatif des résultats obtenus pour les deux vitesses considérées. Les temps de vol du cerf-volant et de parcours sont donnés sous forme de valeurs moyennes par trajet. Les consommations de carburant avec et sans cerf-volant sont également données sous forme de valeurs moyennes par trajet. Les écarts-types associés à ces valeurs sont donnés sous forme adimensionnelle.

Les figures 8 et 9 représentent l'évolution de la consommation et de l'économie de carburant au cours du temps et par trajet. La consommation est exprimée en tonnes de carburant.

Nous constatons une différence de 12% entre la valeur prédite et la valeur constatée sur les mesures. La seule prise en compte des auxiliaires peut combler cet écart, puisque les mesures indiquent un taux de 14% sur les trajets considérés. La résistance ajoutée dans les vagues pouvant aussi représenter jusque à 10 % de la

Pour ces trajets réalisés d'est en ouest, nous observons que les économies réalisées sont modestes, de 3 à 6% respectivement pour les vitesses de 19 et 16 nœuds (Tableau 5).

Tableau 5 résultats généraux Le Havre - Halifax 16 et 19 nœuds

Vitesse cible : 16 nœuds	
Economie moyenne	6.0 %
Temps de parcours moyen/Trajet	166.3 h
Temps de vol moyen/Trajet	98.9 h
Puissance moyenne moteur/Trajet	7.0 MW
$\overline{FC}_{kite}^{LH \rightarrow H 16}$ de HFO avec cerf-volant	221.3 t
$\sigma/\overline{FC}_{kite}^{LH \rightarrow H 16}$	6.3%
$\overline{FC}^{LH \rightarrow H 16}$ de HFO sans cerf-volant	235.1 t
$\sigma/\overline{FC}^{LH \rightarrow H 16}$	2.0%
Quantité moyenne de HFO économisée/Trajet	13.8 tonnes
Vitesse cible : 19 nœuds	
Economie moyenne	3.1 %
Temps de parcours moyen/Trajet	140.1 h
Temps de vol moyen/Trajet	70.9 h
Puissance moyenne moteur/Trajet	12.6 MW
$\overline{FC}_{kite}^{LH \rightarrow H 19}$ de HFO avec cerf-volant	324.3 t
$\sigma/\overline{FC}_{kite}^{LH \rightarrow H 19}$	4.1 %
$\overline{FC}^{LH \rightarrow H 19}$ de HFO sans cerf-volant	334.4 t
$\sigma/\overline{FC}^{LH \rightarrow H 19}$	1.5 %
Quantité moyenne de HFO économisée/Trajet	10.2 t

Ensuite, nous pouvons constater une variation de la consommation du navire sans cerf-volant en fonction des conditions météorologiques. Ces variations montrent que la résistance ajoutée due au vent a un impact significatif, de l'ordre de 2% sur la consommation totale du carburant.

L'observation de la distribution des directions du vent relatif sur la figure 10, pour les deux vitesses considérées, montre les raisons de l'écart entre les valeurs de pourcentage d'économies réalisées. Comme exprimé dans le rapport de V. Podeur [15], la façon dont le navire perçoit le vent en fonction de sa vitesse a un impact sur l'efficacité du système. Sur la figure 10, on peut observer que le vent perçu pour une vitesse de 19 nœuds correspond plus souvent à des allures de vent debout (de face) ou de près. Pour une vitesse de 16 nœuds, on observe alors plus souvent des angles plus ouverts du vent relatif, situation où le cerf-volant présente de meilleures performances. Cela se traduit par une augmentation du temps de vol moyen pour un trajet. Pour une vitesse de 19 nœuds, le temps de vol moyen représente 50% de la durée totale du trajet,

alors que pour une vitesse de 16 nœuds, cette proportion est portée à 60%.

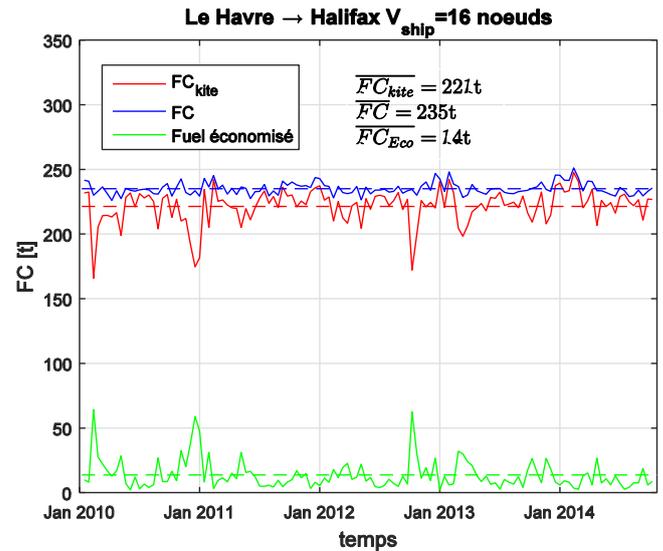


Figure 8 Consommation de carburant Le Havre / Halifax à 16 nœuds.

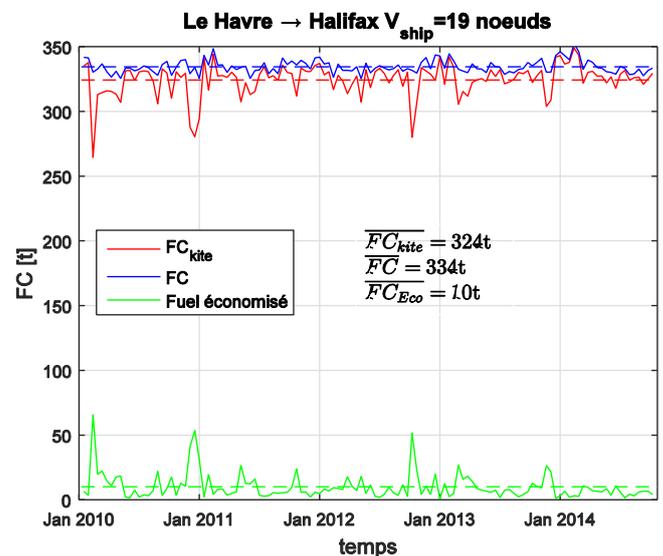


Figure 9 Consommations de carburant Le Havre / Halifax à 19 nœuds.

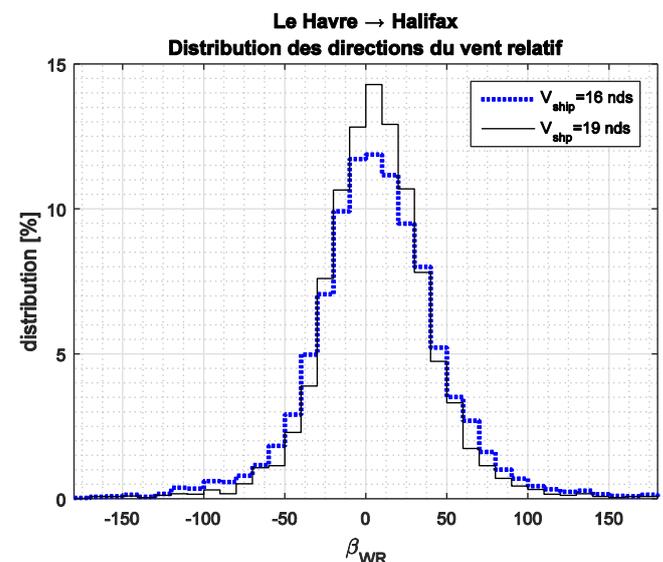


Figure 10 Le Havre - Halifax, distribution du vent relatif.

10.2 Trajet Halifax → Le Havre

Le tableau 5 donne un récapitulatif des résultats obtenus pour les deux vitesses considérées.

Tableau 6 résultats généraux Halifax - Le Havre 16 et 19 nœuds

Vitesse cible : 16 nœuds	
Economie moyenne	18.2 %
Temps de parcours moyen/Trajet	165.8 h
Temps de vol moyen/Trajet	134.8 h
Puissance moyenne moteur/Trajet	6.0 MW
$\overline{FC}_{kite}^{H \rightarrow LH 16}$ de HFO avec cerf-volant	188.1 t
$\sigma / \overline{FC}_{kite}^{H \rightarrow LH 16}$	14.9 %
$\overline{FC}^{H \rightarrow LH 16}$ de HFO <u>sans</u> cerf-volant	230.4 t
σ / \overline{FC}	1.9 %
Quantité moyenne de HFO économisée/Trajet	42.3 t
Vitesse cible : 19 nœuds	
Economie moyenne	10.2 %
Temps de parcours moyen/Trajet	140.1 h
Temps de vol moyen/Trajet	104.7 h
Puissance moyenne moteur/Trajet	11.4 MW
$\overline{FC}_{kite}^{H \rightarrow LH 19}$ de HFO avec cerf-volant	294.7 t
$\sigma / \overline{FC}_{kite}^{H \rightarrow LH 19}$	9.6 %
$\overline{FC}^{H \rightarrow LH 19}$ de HFO <u>sans</u> cerf-volant	328.3 t
$\sigma / \overline{FC}^{H \rightarrow LH 19}$	1.2 %
Quantité moyenne de HFO économisée/Trajet	33.6 t

Comparativement aux résultats obtenus pour la route inverse Le Havre – Halifax, l'observation des figures Figure 11 et 12 ainsi que le tableau 6 nous montre une plus grande dispersion des résultats autour de la valeur moyenne, et ce pour l'ensemble des jeux de données associées aux deux vitesses cibles considérées. Ce phénomène est d'autant plus marqué lorsque le cerf-volant est utilisé. L'écart-type normalisé passant de 6.3% à 14.9% pour une vitesse de 16 nœuds, et de 4.1% à 9.6% pour une vitesse de 19 nœuds.

Il est intéressant de noter l'impact du cycle saisonnier sur l'efficacité du système. En effet, nous pouvons observer que les meilleurs rendements sont obtenus pour les périodes hivernales, au voisinage du mois de janvier de chaque année.

Concernant la variation des consommations du navire sans cerf-volant, la même remarque que celle faite précédemment dans la section 10.1 peut s'appliquer ici. Comme observé dans la section précédente, les conditions de vent observées à 16 nœuds sont plus favorables avec une fréquence plus importante d'angle β_{WR} supérieur à 60° et inférieurs à -60° , correspondants à des allures de vent arrière, grand

largue et travers (Figure 13). Pour une vitesse de 19 nœuds, le temps de vol moyen représente alors 75% de la durée totale du trajet. Pour une vitesse de 16 nœuds, celle-ci représente 81% (Tableau 6).

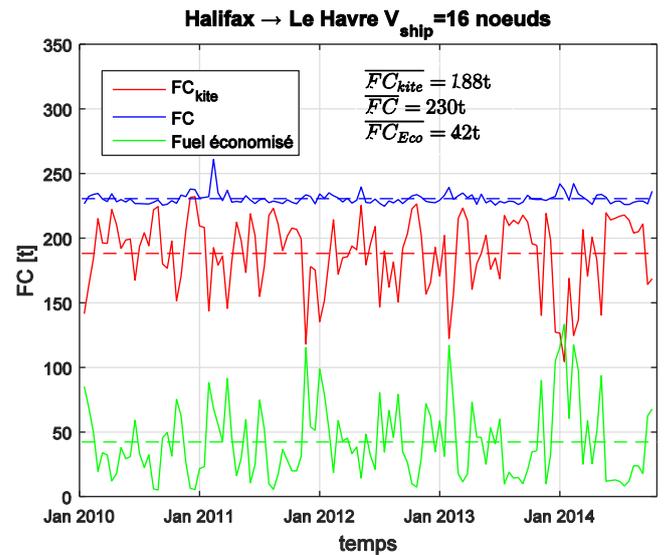


Figure 11 Consommation de carburant Halifax / Le Havre à 16 nœuds.

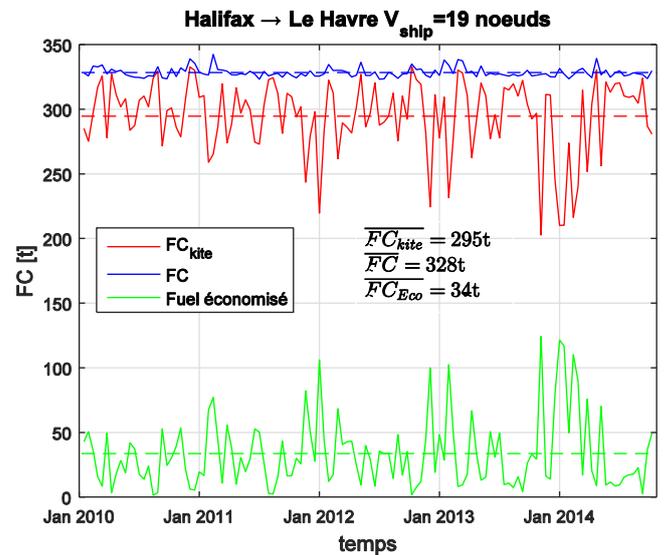


Figure 12 Consommation de carburant Halifax / Le Havre à 19 nœuds.

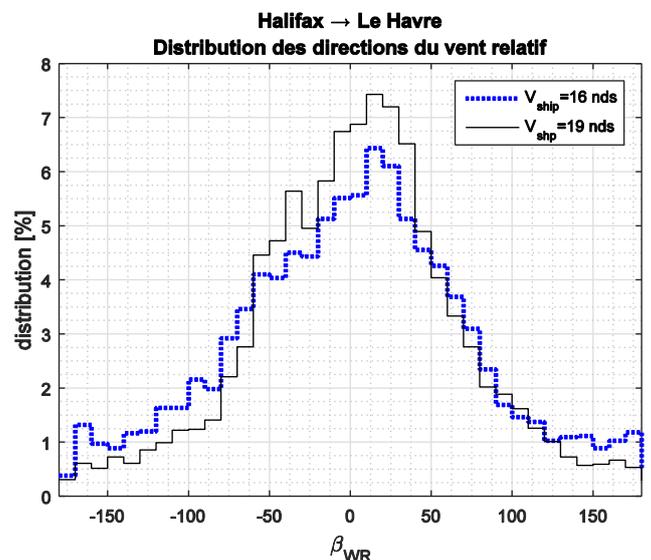


Figure 13 Halifax - Le Havre, distribution du vent relatif.

Comparativement aux résultats affichés sur la figure 10, on observe pour les deux vitesses considérées, une plus grande occurrence de conditions favorables ($\beta_{WR} > 50^\circ$ et $\beta_{WR} < -50^\circ$) dans le sens Halifax → Le Havre que Le Havre → Halifax. Cette différence explique celle existante en termes d'économies de carburant.

10.1 Bilan aller-retour

Le bilan aller-retour est obtenu en faisant la moyenne des résultats précédant. Ceux-ci sont résumés dans le tableau 7 où l'on observe qu'une augmentation de la vitesse de moins de 20% revient à réduire l'économie réalisée pratiquement de moitié.

Tableau 7 Bilan aller-retour

Vitesse cible : 16 nœuds	
Economie moyenne	12.1 %
Vitesse cible : 19 nœuds	
Economie moyenne	6.6 %

11 Discussion

L'utilisation de cet outil nécessite qu'une attention particulière soit apportée à l'évaluation de la résistance à l'avancement du navire. Une sous-estimation de celle-ci pour une consommation donnée peut engendrer une surestimation de la quantité de carburant consommé et ainsi faire diminuer le pourcentage d'économie réalisé par le système de propulsion par cerf-volant.

Le fait de ne pas prendre en compte la résistance ajoutée dans les vagues induit une sous-estimation de la consommation du carburant, plus spécialement lors de conditions météorologiques adverses. L'effet des salissures de la coque et de l'hélice sur l'augmentation de la consommation au cours de la vie du navire sont également négligés.

La modélisation de la consommation auxiliaire permettrait une meilleure évaluation de la consommation globale du navire et du pourcentage de carburant économisé. On note par exemple sur le cas de validation présenté à la section 9 que notre outil de prédiction sous-estime de 12% la consommation par rapport aux valeurs mesurées. Si cet écart est confirmé, cela signifie qu'il faut diminuer d'autant les pourcentages d'économies réalisées sur la consommation de carburant.

Le choix de la vitesse de croisière influe aussi sur l'évaluation de la contribution du système de propulsion en termes d'économie de carburant. Du fait de la diminution du chargement de l'hélice, induite par la traction par cerf-volant, elle n'est plus utilisée à son point optimal de fonctionnement. Réévaluer l'hélice optimale pour la vitesse de croisière considérée et une

force de traction du cerf-volant donnée, permettrait d'évaluer de façon plus juste les effets de la baisse de vitesse sur les performances du système de propulsion par cerf-volant.

La prise en compte d'hypothèses moins simplificatrices pour la modélisation de la propulsion du navire, notamment concernant les coefficients de succion ($1 - t$) et de sillage ($1 - w$), permettrait une évaluation plus précise de la force propulsive T et donc de la consommation.

Aux questions de consommation de carburant s'ajoutent celles relatives au dimensionnement de l'aile par rapport aux navires. Seuls les efforts longitudinaux étant évalués, l'effet de l'augmentation de la surface du cerf-volant sur les efforts transversaux et la capacité du navire à suivre une route sans une dérive trop importante doivent être évalués par ailleurs. Naaijen [6] et Leloup [8] indiquent une méthode simple pour estimer l'angle de dérive et la résistance à l'avancement supplémentaire associée. Ils montrent, sur le cas particulier d'un tanker de 50000 DWT tracté par un cerf-volant de 320m², que l'effet de la dérive peut être négligé.

12 Conclusion

Un outil de prédiction des économies de carburant pour des navires marchands tractés par cerf-volant a été présenté. Cet outil rapide permet de traiter des calculs massifs sur de longues périodes, pour plusieurs routes et pour plusieurs navires.

Le modèle pour le calcul de la consommation de carburant a été validé à l'aide de mesures réalisées au réel sur un parcours transatlantique et sur une période de 3 années et demi.

Un cas d'étude a été présenté pour un porte-conteneurs de classe Fort de 2200 EVP naviguant entre Halifax et le Havre et équipé d'un cerf-volant de 800m². Cette étude indique une économie potentielle de 12.1% et 6.6% sur la consommation de carburant du navire à 16 nœuds et 19 nœuds respectivement.

Remerciement

Les auteurs remercient l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie pour son support à l'étude présentée.

Bibliographie

- [1] Traut, M., Gilbert, P., Walsh, C., Bows, A., Filippone, A., Stansby, P., & Wood, R. (2014). *Propulsive power contribution of a kite and a Flettner rotor on selected shipping routes.*

- Applied Energy, 113, (pp. 362-372).
- [2] Pallu de la Barrière, P., et Védrenne, J. (2014). *Analysis of wind propulsion for cargo ships and workboats*. ATMA conference, Paris.
- [3] Shukla, P., & Ghosh, K. (2009). *Revival of the modern wing sails for the propulsion of commercial ships*. International Journal of Civil and Environmental Engineering, 13.
- [4] Bøckmann, E., & Steen, S. (2011, June). *Wind turbine propulsion of ships*. In Second international symposium on Marine Propulsors, smp (Vol. 11), Hambourg.
- [5] Smulders, F. (1985). *Exposition of calculation methods to analyse wind-propulsion on cargo ships*. Journal of wind engineering and industrial aerodynamics, 19(1), (pp. 187-203).
- [6] Naaijen, P., & Koster, V. (2007, June). *Performance of auxiliary wind propulsion for merchant ships using a kite*. In 2nd International Conference on Marine Research and Transportation (pp. 45-53), Naples.
- [7] Dallinga, R. (2005). *Fuel saving by means of traction kites*. MARIN internal report, Wageningen
- [8] Leloup, R., Roncin, K., Behrel, M., Bles, G., Leroux, J. B., Jochum, C., & Parlier, Y. (2016). *A continuous and analytical modelling for kites as auxiliary propulsion devoted to merchant ships, including fuel saving estimation*. Renewable Energy, 86, (pp. 483-496).
- [9] Behrel, M., Bigi, N., Roncin, K., Grelon, D., Montel, F., Nême, A., Leroux, J., Jochum, C., Parlier, Y. (2016). *Measured Performance of a 50-m² Kite on a Trawler*. HIPER, (pp. 443-457), Cortona.
- [10] Journée, JMJ. (2003). *Review of the 1979 and 1980 Full-Scale Experiments Onboard Containership mv Hollandia*. Technical Report. Ship Hydromechanics Laboratory, Delft University of Technology, 1349.
- [11] Van Leeuwen, G., & Journée, J. M. J. (1970). *Prediction of Ship Manoeuvrability Making Use of Model Tests*. Technical Report. Ship Hydromechanics Laboratory, Delft University of Technology (April), 288.
- [12] Holtrop, J. Mennen, G. G. (1982). *An approximate power prediction method*. Int. shipbuilding , 29, (pp. 166-177)
- [13] Blendermann, W. (1986). *Die Windkräfte am Schiff*. Entwerfen von Schiffen und Schiffssicherheit M-6
Ship Design and Ship Safety M-6,
Schriftenreihe Schiffbau, 467.
- [14] Leloup, R., Roncin, K., Bles, G., Leroux, J. B., Jochum, C., & Parlier, Y. (2013). *A novel modeling for performance assessment of kites as auxiliary propulsion device for merchant ships*. In 16th International Conference on Computer Applications in Shipbuilding, Busan.
- [15] Podeur, V. (2014). *Merits of wind assisted propulsion for low powered ships* (Thèse de Master). ENSTA-Bretagne, Brest.