

## Coupler un cerf-volant à un navire : le retour de la propulsion à voile

Morgan Behrel, Nedeleg Bigi, Guilhem Bles, Chloé Duport, Christian Jochum, Richard Leloup, Jean-Baptiste Leroux, Antoine Maison, Frédéric Montel, Alain Nême, Yves Parlier\*, Vincent Podeur, Kostia Roncin, Alain de Solminihac

Institut de recherche Henri Dupuy de Lôme (IRDL), CNRS/ENSTA Bretagne/Université Bretagne occidentale/Université Bretagne-Sud - 29 200 Brest, France.

\* Beyond the Sea, 1010 avenue de l'Europe, 33 260 La Teste-de-Buch, France.

Face aux émissions de gaz à effet de serre engendrées par un transport maritime de plus en plus important, le projet Beyond the Sea du navigateur Yves Parlier propose une propulsion auxiliaire des navires par de grands cerfs-volants (kites) (Fig. 1). Contrairement à un gréement classique, ils réduisent très peu la charge maximale et, à surface égale, génèrent une traction plus forte. Soutenu par l'Ademe, ce projet prometteur implique un consortium cinq partenaires industriels (Bopp, Cousin-Trestec, DAAM, Porcher Industries, CMA-CGM) et le laboratoire IRDL.



Figure 1 : Cerf-volant de 35 m<sup>2</sup>.

### 1 — Une prédiction de la performance multiroute, multimétéo, multinavire

Bien que très originale et séduisante, l'utilisation d'un cerf-volant géant comme aide à la propulsion d'un cargo doit prouver son intérêt économique et environnemental. Un outil spécifique, qui repose sur un algorithme, évalue ainsi les économies de carburant réalisées (Podeur, 2018). Sa fiabilité doit cependant porter sur des périodes de plusieurs années, pour différentes routes, différentes conditions météo et différents navires.

Les performances d'une propulsion par cerf-volant doivent être appréciées selon deux conditions de navigation : à vitesse constante ou à puissance constante. Prisés dans le monde de la course, des outils de prédiction de performance existent déjà (Naiijen, 2007), mais ont été améliorés avec la prise en compte de l'opérabilité et des modes de vol du kite. Il est quasi-stationnaire par rapport au navire en vol statique, tandis que le vol dynamique augmente beaucoup l'effort de traction, grâce à un pilotage du cerf-volant sur une trajectoire relative au bateau. Celle-ci, le plus souvent en forme de huit, est également optimisée dans l'outil prédictif de performance (Leloup, 2016).

L'algorithme de cet outil discrétise les données météorologiques pour les adapter à la route maritime choisie. Elle est elle-même discrétisée en assez de points pour une représentation cohérente de l'évolution spatiale des conditions météorologiques. L'équilibre des forces agissant sur le navire est alors calculé pour chaque nouvelle condition météorologique rencontrée, afin d'évaluer le comportement du système au cours d'un trajet ou du voyage complet. La modélisation du navire se limite à l'évaluation des efforts longitudinaux, les seuls pris en compte pour évaluer les résistances aérodynamiques et hydrodynamiques à la propulsion du navire. La part aérodynamique est fonction de la vitesse du vent relatif, de sa direction ainsi que de la forme générale du navire et de son chargement. La résistance hydrodynamique est limitée au cas de l'avancement en eau calme. La résistance ajoutée des vagues est négligée pour cette approche.

La chaîne de propulsion est essentiellement décrite grâce à des courbes en eau libre de l'hélice du navire. Le programme d'optimisation fournit la force propulsive moyenne du cerf-volant sur une trajectoire en fonction de la vitesse du navire, de la vitesse du vent réel et de sa direction dans le repère lié au navire (Leloup, 2016). La trajectoire optimale naît d'un compromis entre la zone de pleine puissance de la fenêtre de vol et la direction d'évolution du navire (Leloup, 2013).

Une vaste base de données a été conçue sur la propulsion par cerf-volant en fonction des conditions de navigation, pour une large étendue de vitesses de navire, de directions et de vitesses de vent réel ainsi que des contraintes d'utilisation du kite. Elle simule cinq cents trajets transatlantiques en un peu moins de huit heures sur un ordinateur personnel. Elle est soixante fois plus rapide que le calcul exact, dont elle s'écarte de moins de 10 %.

La consommation dépend directement du temps de navigation, de la consommation spécifique et de la puissance développée par les moteurs. Cette chaîne de calcul pour le navire seul a été validée à l'aide de mesures concrètes sur un parcours transatlantique, sur trois ans et demi.

Les économies de carburant réalisées ont été observées sur cinq ans, avec un porte-conteneurs voguant entre le Havre et Halifax, aidé d'un kite de 800 m<sup>2</sup>. Les économies moyennes se situent de 12,1 % et 6,6 %, respectivement à 16 et 19 nœuds. L'augmentation de la vitesse de moins de 20 % réduit quasiment de moitié l'économie réalisée (Podeur, 2018). L'impact des dimensions du kite sur le navire reste cependant à évaluer, en particulier ses effets sur les efforts transversaux et la capacité du bateau à suivre une route sans trop dériver.

## **2 — Tenue à la mer et manœuvrabilité d'un navire tracté par kite**

En négligeant les interactions entre le navire et le cerf-volant, les économies de carburant peuvent-être significatives. Ces hypothèses sont fortes car le cerf-volant impose des mouvements au bateau qui, en étant soumis aux vagues, peut modifier son vol en retour. Une modélisation dynamique du système doit estimer plus précisément les performances et l'opérabilité d'un navire tracté par cerf-volant.

Ce modèle néglige la masse du cerf-volant et suppose que ses lignes sont droites et indéformables. Une évolution linéaire des coefficients aérodynamiques en fonction de la courbure de la trajectoire de vol est proposée. Par ailleurs, la prise en compte des efforts de traînée aérodynamique montre que, à partir de 2 m/s de vent relatif, l'hypothèse de ligne droite est raisonnable. En se basant sur un modèle de ligne, on obtient un critère analytique de

vitesse de vent minimum permettant un vol quasi statique. Ainsi dans le cas du cerf-volant, vu précédemment, de  $800 \text{ m}^2$ , d'une masse de  $400 \text{ kg}$  et d'une ligne de  $55 \text{ mm}$  de diamètre et pesant  $2,4 \text{ kg/m}$ , le lancement du kite demande un vent minimum de  $3,5 \text{ m/s}$ .

De son côté, la résolution de l'ensemble des interactions entre le cerf-volant et le navire réclame un modèle linéarisé et temporel de tenue à la mer. Les méthodes basées sur les réponses impulsionnelles offrent des développements raisonnables et des calculs rapides (Fossen, 2005). Mais comme cette approche représente mal les mouvements horizontaux des navires, elle est donc ici couplée à un modèle de manœuvrabilité paramétrique selon différents types de navires (Yoshimura, 2012).

Les interactions entre le cerf-volant et le navire s'étudient par comparaison d'un couplage dissocié et d'un couplage monolithique, qui néglige l'influence des mouvements du bateau sur le kite. Sur une mer calme, les deux couplages montrent des résultats très proches. En cas de houle régulière, l'amplitude de la force de traction du cerf-volant diminue de près de  $34 \%$  et l'efficacité du kite augmente de jusqu'à  $4 \%$  (Bigi, 2017).

### 3 — Analyse expérimentale

Un pilote automatique a été implémenté afin de confronter les modélisations numériques aux grandeurs réelles (Fagiano, 2013). Il actionne le kite en vol dynamique avec une bonne répétabilité. Une première campagne s'est déroulée sur un chalutier québécois de  $12 \text{ m}$  pour mesurer l'influence d'un cerf-volant de  $50 \text{ m}^2$  en vol statique. La seconde était dédiée uniquement aux performances d'un kite en vol dynamique, menée à terre pour s'affranchir des contraintes liées au mouvement d'un navire. Enfin, la troisième campagne a été réalisée sur une plateforme d'essais de six mètres, spécialement conçue pour la mer et grâce aux retours précédents (Fig. 2).



Figure 2. De gauche à droite : le chalutier du premier essai, le banc de mesure du kite et le KiteLab.

Les données acquises ont fourni des estimations des variations des paramètres aérodynamiques, comme le coefficient de portance (Fig. 3a) et la finesse du kite, le long d'une trajectoire en huit. Ces variations sont à mettre en relation avec les fortes déformations structurelles du kite observées lors de ces essais, et sont liées à une géométrie d'aile et à un réglage donné. Ces résultats ont cependant été intégrés en première approximation dans notre modèle de tenue à la mer et de manœuvrabilité. Les mesures du KiteLab ont également permis d'établir la polaire du bateau, c'est-à-dire sa courbe de performance en fonction de sa vitesse (Fig. 3 b). Elle confirme la possibilité de remonter contre le vent avec des navires tractés par kite.

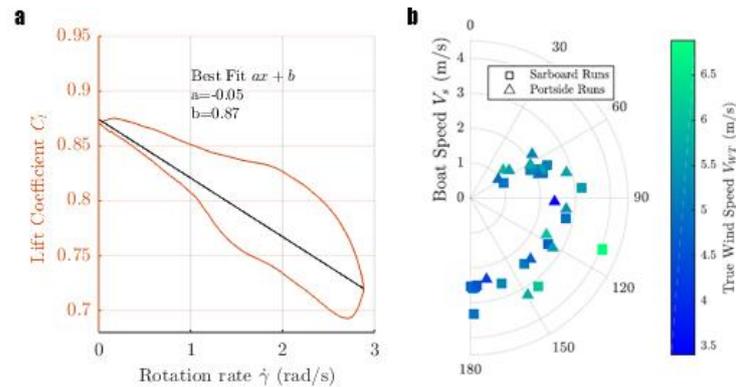


Figure 3. a : évolution du coefficient de portance du kite en fonction du taux de rotation, traduisant la position du kite le long de sa trajectoire en huit. b : polaire du KiteLab tracté par un kite de  $12 \text{ m}^2$  en fonction de l'angle de vent réel et de la force du vent réel (barre de couleur).

Le dimensionnement du kite en vol découle des informations et d'une meilleure compréhension de son vol. Pour tracter un navire, un kite doit montrer une haute résistance mécanique, une importante déformabilité et une faible masse. Ces propriétés passent généralement par l'emploi de tissus enduits comportant des fibres de polyester. Le prédimensionnement de la structure du kite a été élaboré à partir d'une charge alaire cible, soit la force de traction divisée par la surface du cerf-volant. En découlent le choix du tissu pour la canopée et les boudins, du diamètre moyen du bord d'attaque, du nombre et des diamètres des brides et lignes avant et arrière. Ces dernières sont généralement constituées de cordages formés de fibres en polyéthylène haute densité à haute performance. On estime également les conditions d'opérabilité du système selon les vitesses de vent réel minimale et maximale pour une vitesse du navire et l'orientation relative du vent.

Le dimensionnement du cerf-volant s'effectue dans un cadre quasi statique avec écoulement aérodynamique stationnaire, à cause des faibles actions inertielles subies par le kite et la relative stabilité du vent par rapport au navire. La souplesse du cerf-volant engendre des déformations globales importantes qui modifient l'écoulement fluide, et donc le niveau de pression autour du cerf-volant. Ce système mécanique fluide-structure est ainsi fortement couplé. La solution convergée de ce problème nécessite un bouclage itératif entre calculs d'aérodynamique d'une part et de structure d'autre part.

#### 4 — Calculs aérodynamiques et de structure

Une approche simplifiée limite le volume et le temps de calcul : la géométrie du kite est raisonnablement assimilable à celle d'une aile. Ainsi, un modèle de ligne portante 3D non linéaire associé à la théorie des ailes peut s'appliquer afin de déterminer le champ de pression exercé sur le kite. La maquette numérique du cerf-volant doit être adaptée pour déterminer la position et l'orientation des sections aérodynamiques, à partir des coordonnées des points de bord d'attaque et bord de fuite.

Malgré les déformations importantes de l'aile, comme sa torsion (vrillage) et le rapprochement ou l'éloignement de ses oreilles, les sections aérodynamiques sont supposées rigides. Cette hypothèse a été validée par comparaison des coefficients de portance et de traînée, ainsi que des distributions de pression pour quelques sections géométriquement caractéristiques des déformations estimées. La méthode de ligne portante permet *in fine*

d'obtenir un angle d'incidence effectif pour chaque section et d'en déduire les résultantes aérodynamiques locales et globales, ainsi que la distribution des coefficients de pression sur la totalité du kite (Duport, 2016) (Fig. 4-a).

Pour les calculs de structure, une approche très simplifiée a là aussi été adoptée. Elle consiste à représenter l'aile comme une poutre (*Kite as a Beam*) (de Solminihac, 2018) (Fig. 4 b). Les configurations les plus critiques du vol dynamique du kite ont ainsi été identifiées.

Le dimensionnement des éléments constitutifs du cerf-volant nécessite quant à lui un modèle plus fin (Maison, 2017) (Fig. 4-c). Une épaisseur fictive est appliquée sur les éléments coques permettant d'éviter les phénomènes de plissement, tout en conservant une très bonne représentation du comportement membranaire de la canopée. Les barres ne possèdent aucune rigidité en compression afin de représenter plus fidèlement le comportement d'un cordage.

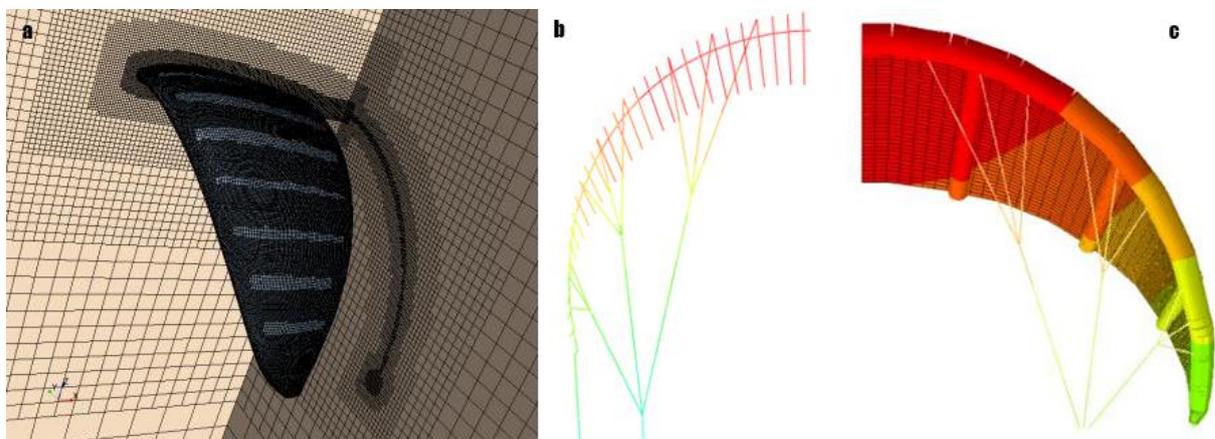


Figure 3. a : maillage Star-CCM+. b : modèle *kite as a beam*. c : modèle Abaqus.

## 5 — Conclusion

La traction auxiliaire d'un navire par kite révèle un réel potentiel pour réduire la consommation de carburant fossile, tout en restant compatible avec la stabilité et la manœuvrabilité d'un navire, ainsi qu'avec le niveau de sollicitation permis par les matériaux disponibles. Les travaux du laboratoire IRDL ont abouti à des outils utilisables par Beyond the Sea, afin de répondre à ses besoins pour la conception d'un kite pour tout type de navire et d'exploitation. Ces travaux ouvrent également la voie à l'amélioration des modèles de dimensionnement du cerf-volant et de la robotisation de son système de lancement et de récupération.

## Références

BIGI, N. *et al* (2017). *Analytical Tether Model for Static Kite Flight*. Airborne wind energy. Springer.

DUPORT, C. *et al* (2016), *Comparison of 3D nonlinear lifting line method calculations with 3D RANSE simulations and application to the prediction of the global loading on a cornering kite*. In 15th Journées de l'Hydrodynamique, Brest.

FAGIANO, L. *et al* (2013). *On modeling, filtering and automatic control of flexible tethered wings for airborne wind energy*. Green Energy and Technology, 167–180.

FOSSEN, T. (2005). *A nonlinear unified state-space model for ship maneuvering and control in a seaway*. International Journal of Bifurcation and Chaos 15 (09), 2717–2746.

LELOUP, R. *et al* (2013). *A novel modeling for performance assessment of kites as auxiliary propulsion device for merchant ships*. 16<sup>th</sup> International Conference on Computer Applications in Shipbuilding, Busan.

LELOUP, R. *et al* (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).

MAISON, A. *et al* (2017), *De la problématique de dimensionnement de grands kites*, mémoire n° 2717 de l'Association technique maritime et aéronautique (ATMA).

NAAIJEN, P. & KOSTER, V. (2007). *Performance of auxiliary wind propulsion for merchant ships using a kite*. In 2<sup>nd</sup> International Conference on Marine Research and Transportation (pp. 45–53), Naples.

PODEUR V. *et al* (2018). La Houille Blanche, n° 1, p. 5-7.

DE SOLMINIHAC, A. *et al* (2018), *Kite as a Beam : a fast method to get the flying shape*, Airborne Wind Energy, Book Chapter, Springer.

YOSHIMURA, Y. & Y. MASUMOTO (2012). *Hydrodynamic database and manoeuvring prediction method with medium high-speed merchant ships and fishing vessels*. Proceedings of International MARSIM Conference.