



HAL
open science

Algorithme de positionnement d'une passerelle à mouvements compensés à partir de mesures inertielles et lidar pour les opérations de maintenance des parcs éoliens offshore

Pierre Merriaux, Rémi Boutteau, Pascal Vasseur, Xavier Savatier

► To cite this version:

Pierre Merriaux, Rémi Boutteau, Pascal Vasseur, Xavier Savatier. Algorithme de positionnement d'une passerelle à mouvements compensés à partir de mesures inertielles et lidar pour les opérations de maintenance des parcs éoliens offshore. *Reconnaissance de Formes et Intelligence Artificielle (RFIA)* 2014, Jun 2014, Rouen, France. hal-00989108

HAL Id: hal-00989108

<https://hal.science/hal-00989108>

Submitted on 9 May 2014

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Algorithme de positionnement d'une passerelle à mouvements compensés à partir de mesures inertielles et lidar pour les opérations de maintenance des parcs éoliens offshore

P. Merriaux¹ R. Boutteau¹ P. Vasseur² X. Savatier¹

¹IRSEEM (Institut de Recherche en Systèmes Electronique Embarqués)

²LITIS (Laboratoire d'Informatique, du Traitement de l'Information et des systèmes)

Résumé

Cet article étudie la faisabilité d'un système extéroceptif pour le pilotage d'une passerelle à mouvements compensés sans contact utilisable dans les opérations de maintenance des parcs éoliens en mer. Notre étude montre que les systèmes actuels basés uniquement sur des centrales inertielles ne sont pas assez précis pour garantir le maintien de la passerelle sans un arrimage mécanique. A partir de la mesure d'un lidar 2D nous proposons une méthode temps réel de suivi de la position de la passerelle par rapport à l'éolienne offshore. Notre algorithme consiste à détecter et à estimer la position de la pile de l'éolienne dans un nuage de points 2D par des approches robustes. Afin d'évaluer notre méthode nous avons mis en place une chaîne de simulation 3D temps réel alimentée avec des données issues de mesures réelles. Nous obtenons une précision de mesure de l'ordre du centimètre, en temps réel, dans des scénarios représentatifs des états de mer.

Mots Clef

Fusion de capteurs, robotique, reconnaissance de formes, lidar, ransac, Kalman, détection et suivi

Abstract

This article deals with an exteroceptive system for controlling a compensated gangway suitable in offshore services. Our study has shown that actual systems based on inertial measurement units are not precise enough to guarantee a correct compensation without any mechanical link with the structure. In this paper, we propose a real-time gangway positioning algorithm based on 2D lidar measurement. Our method consists in detecting and estimating the position of the wind turbine mast using robust approaches. The method has been evaluated in real time with the help of a complete 3D simulation framework. Results have shown that the achievable precision is less than 1cm in realistic sea states.

Keywords

Sensor fusion, robotics, pattern recognition, lidar, ransac, Kalman, detection and tracking

1 Introduction

Les objectifs de l'Union Européenne d'amener à 23% la part d'électricité produite par des énergies renouvelables ont induit une forte croissance d'activités dans ce domaine et plus particulièrement celui de la production par des parcs éoliens offshore. En 2012, plus de 1 500 éoliennes étaient déjà déployées au sein de 55 parcs offshore, principalement en mer du Nord et en Atlantique [17]. Les contraintes économiques liées aux déploiements de ces parcs (forts

investissements, régulation des tarifs de l'électricité) exigent un taux très élevé de disponibilité dans leur exploitation ce qui suppose une capacité à intervenir rapidement et par tous temps, soit par air (hélicoptère) soit par mer (navire). Cette dernière solution est la plus économique mais pose des problèmes de sécurité pour les opérateurs de maintenance souvent peu aguerris aux conditions d'intervention en mer. Aussi voit-on de plus en plus se développer des concepts de passerelles dites à « mouvements compensés » permettant d'effectuer des opérations de transbordement entre le navire et l'éolienne depuis une plateforme stabilisée. La plus connue est celle d'Ampelmann [1] conçue à partir d'une base hexapode.

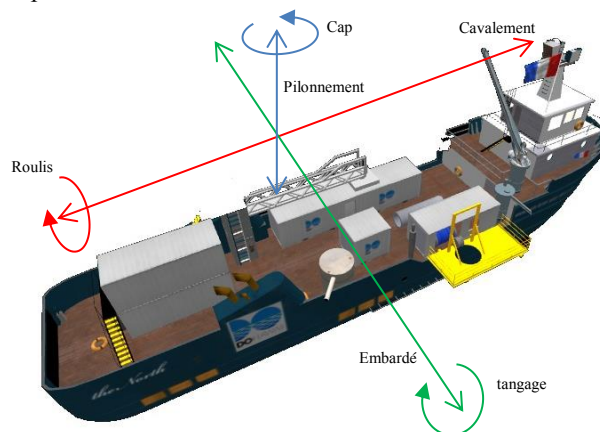


Figure 1 : Axes et angles utilisés dans cette étude

D'autres solutions existent ou sont en cours de développement, basées sur des structures de type tourelle et échelle télescopique [2][3][5][6] ou de type nacelle avec bras poly-articulé [4]. A l'exception de la solution [4], tous ces systèmes nécessitent un arrimage mécanique sur un dispositif qui doit être installé à demeure sur l'éolienne. Cette contrainte fait qu'il est difficile de désengager rapidement la passerelle en cas de problème et impose que le navire se maintienne dans une position et une orientation précises par rapport à l'éolienne. Dans cet article, nous proposons d'étudier la faisabilité d'une solution d'attelage sans contact basée sur une mesure inertielle du mouvement du navire couplée à une mesure par télémétrie laser.

2 Chaîne de perception pour la compensation des mouvements d'une passerelle sans contact

2.1 Analyse du système

La passerelle à mouvements compensés peut être vue comme un système mécatronique embarqué sur le navire et dont la fonction est de contre réagir aux mouvements dus aux effets

conjugués de la houle, du courant et du vent. Les navires destinés à recevoir ce type de passerelle sont nécessairement équipés d'un système de positionnement dynamique (DP) dont les performances permettent aujourd'hui de maintenir un navire de type monocoque de moins de 100m dans une ellipse de 1 à 1.5m de côté. Les mouvements compensés par le DP sont uniquement les translations : cavalemt et embardée (Figure 1).

Comme le montre le synoptique de la Figure 2, un des facteurs clés de la performance d'un tel système est le sous-système de perception. Actuellement la plupart des solutions utilisent des centrales inertielles (IMU) qualifiées marine.

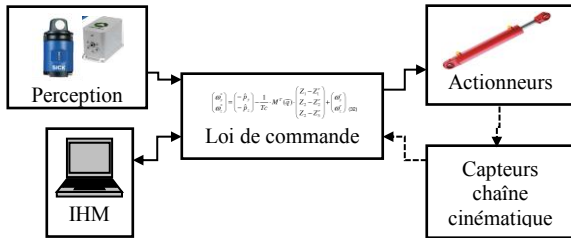


Figure 2: Synoptique d'un système de passerelle compensée

Comme nous le montrons dans la suite de cet article, toutes les centrales inertielles du marché présentent des erreurs sur les mesures de translation et de rotation. Dans le cas d'une passerelle sans arrimage mécanique, ces erreurs se traduiront par des écarts de positionnement en bout de passerelle qui ne pourront être corrigés sauf à disposer d'une information de distance entre la passerelle et la zone d'accès de l'éolienne. Afin de déterminer la performance exigée d'un système de mesure de distance embarquée sur la passerelle, il est nécessaire d'évaluer les performances atteignables avec les centrales inertielles qualifiées marine dans l'état actuel des technologies.

2.2 Etude comparative des performances de centrales inertielles qualifiées pour des applications marines

Afin d'objectiver les performances atteignables avec centrales inertielles couramment utilisées pour des applications marines, nous avons effectué un comparatif de performances sur trois centrales représentatives des différentes technologies (MEMS, FOG). Ces tests ont été menés en collaboration avec Ifremer-Brest [14]. Une étude de tenue à la mer d'une coque de 50 mètres a permis d'obtenir les mouvements réels que subirait le navire pour des états de mer représentatifs de ceux rencontrés sur les parcs actuellement déployés en Mer du Nord (Figure 4). Ces mouvements ont ensuite été appliqués à un hexapode (Figure 5) sur lequel les trois centrales inertielles sous test ont été installées. Il faut souligner le fait que le principe de traitement embarqué dans les centrales inertielles de type marine ne permet pas la mesure du cavalemt et de l'embarquée. Les erreurs en mesure d'angle et de pilonnement sont montrées dans la TABLE I. En considérant une passerelle de 20m de portée, elles se traduisent par des erreurs de distance de 8,5 cm pour la centrale FOG à près de 30 cm pour les centrales MEMS. A cette erreur, il faut ajouter celle du système de positionnement dynamique du navire (DP) et que l'on ne peut pas mesurer avec la centrale.

TABLE I. ECART-TYPE (1 σ) ENTRE LA POSITION DE REFERENCE DE L'HEXAPODE ET LES DONNEES DES CENTRALES INERTIELLES

	IMU 1	IMU 2	IMU 3
Roulis (°)	6,415 10-3	3,669 10-2	4,224 10-2
Tangage (°)	7,968 10-3	3,459 10-2	3,453 10-2
Cap (°)	9,972 10-3	2,817	23,803
pilonnement (m)	1,251 10-2	2,285 10-2	3,255 10-2

En conclusion, ces essais confirment qu'il est nécessaire d'adjoindre un dispositif de perception en bout de passerelle.

2.3 Solutions pour la télémétrie en bout de passerelle

Nous cherchons à définir un capteur extéroceptif qui, placé en bout de passerelle, complétera les informations fournies par la centrale inertielle par une mesure des translations horizontales et éventuellement du lacet. L'ensemble de ces mesures sera utilisée par un système de contrôle-commande chargé de l'asservissement en position de la passerelle. Ce paradigme s'apparente à un problème de commande référencée capteur et a été abondamment traité dans le cas de l'asservissement visuel [15][16]. Pour cette application et malgré son coût avantageux, l'utilisation d'un système de vision ne paraît pas être une solution viable. En effet, comme on peut le voir sur l'image centrale de la Figure 3, une pile d'éolienne est très peu texturée, et subit les salissures et la contamination du milieu marin (fouling).

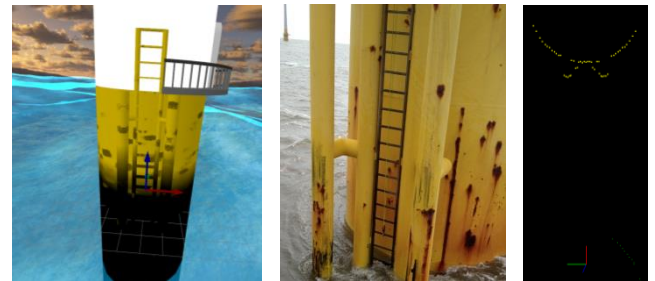


Figure 3 : Pile d'éolienne simulée, réelle et nappe lidar obtenue

Les essais que nous avons menés en simulation sur des méthodes classiques basées vision n'ont pas abouti à des résultats concluants. Une autre solution consiste à utiliser un système de triangulation infrarouge tel que [7] entre autres utilisé pour mesurer le ballant lors du grutage de conteneurs dans les ports et donc bien adapté au milieu maritime ; en outre les performances de mesure ($<0.02^\circ$ soit 1mm à 5m) sont compatibles avec notre application. Cependant, l'utilisation d'une telle solution nécessiterait l'équipement de toutes les éoliennes avec des balises infrarouges actives et qui, de plus, devront être alimentées.

Une solution de télémètre laser 1D telle que [8] permettrait de mesurer une des deux translations mais il faudrait garantir l'alignement de l'extrémité de la passerelle avec le tube de l'éolienne. La solution que nous avons finalement retenue repose sur l'utilisation d'un lidar 2D. Ces systèmes sont en effet largement utilisés pour des applications industrielles en environnement extérieur et en conditions dégradées. Les derniers développements basés sur des méthodes multi-échocs permettent de s'affranchir des problèmes de gouttes d'eau et d'embruns, ce qui rend possible leur utilisation pour des applications sécuritaires pour le grutage dans les ports [18]. Il faut donc développer un algorithme permettant d'extraire la position du tube de l'éolienne, à partir des données d'un lidar

2D, tout en garantissant une précision et un temps de réponse compatibles avec nos algorithmes de contrôle commande.

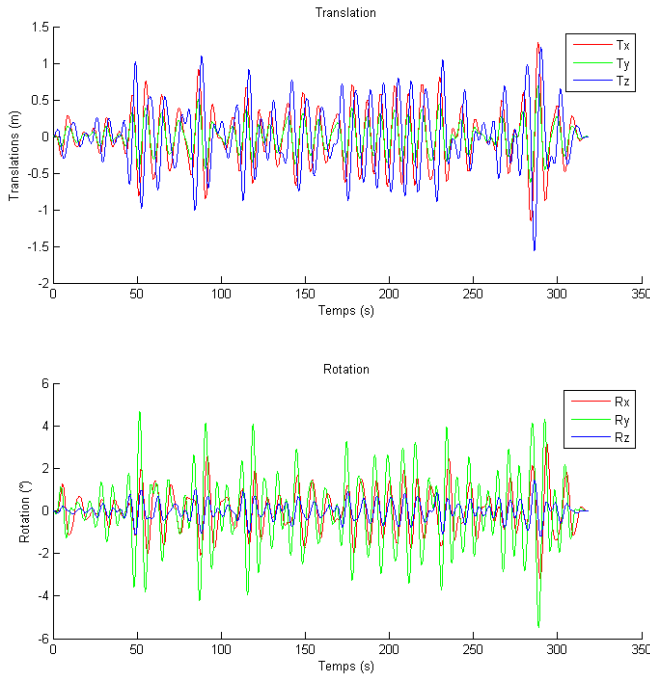


Figure 4 : Mouvement de navire $H_s=2.5m$ (hauteur spécifique de houle), $T_p=9s$ (période de houle), 210° (angle formé entre la coque et la houle)

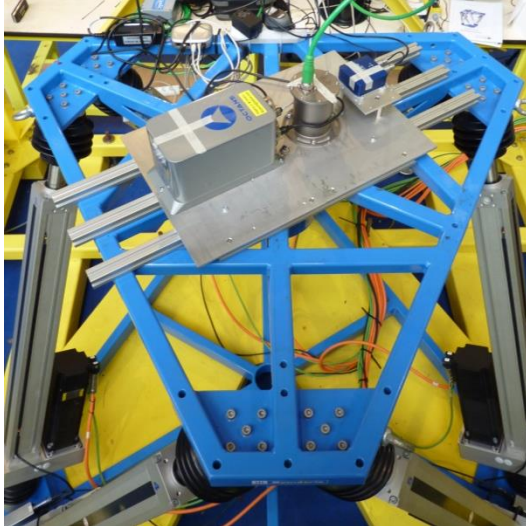


Figure 5 : Hexapode ayant servi à l'évaluation des performances des centrales inertielles à IFREMER Brest

3 METHODE PROPOSEE

3.1 Solution matérielle

L'étude a été menée en considérant une passerelle de type télescopique de 20 m de portée. Un lidar 2D est installé à l'extrémité de la travée fixe. Cette position est un compromis entre la résolution angulaire du lidar et les zones d'ombre générées par des objets trop proches, telles que les défenses de déchargement.

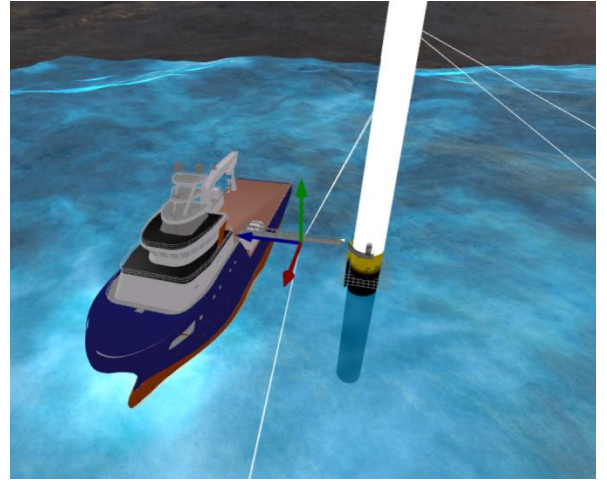


Figure 6 : Position du Lidar sur la passerelle. Le lidar est représenté par le repère rouge-vert-bleu (rouge = axe X, vert = axe Y, bleu = Z)

Dans cette configuration, la nappe laser mesure une coupe horizontale de la pile d'éolienne (partie ancrée du mât). La position relative de la passerelle par rapport à un élément fixe de l'éolienne (échelle, quai de débarquement) peut être calculée si l'on sait déterminer à partir de la mesure lidar le centre et le diamètre du tube de la pile.

3.2 Algorithme d'estimation de la position par lidar

Les mesures lidar étant entachées de bruit, il est nécessaire de s'appuyer sur un algorithme de détection robuste. Dans un premier temps, notre approche a consisté en une détection de cercle associée à un algorithme de type Ransac [13] : à chaque itération, une équation de cercle est calculée à partir de trois points tirés aléatoirement. On conserve le tirage ayant fourni le plus grand nombre de points du nuage obtenu par le lidar vérifiant cette hypothèse. Cela permet d'éliminer les points aberrants n'appartenant pas au tube principal de l'éolienne comme ceux de l'échelle.

Les paramètres du cercle de l'éolienne (centre $C(x_0, y_0)$ et rayon r), peuvent être déterminés à partir de trois points grâce aux équations suivantes :

$$R^2 = (x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 \quad (1)$$

soient (x_1, y_1) , (x_2, y_2) et (x_3, y_3) 3 points

$$\begin{aligned} a_1 &= (y_1 - y_3)/(x_1 - x_3) \\ a_2 &= (y_2 - y_3)/(x_2 - x_3) \\ b_1 &= (y_1 + y_3)/2 + \frac{(x_1 + x_2)/2}{a_1} \\ b_2 &= (y_2 + y_3)/2 + \frac{(x_2 + x_2)/2}{a_1} \\ x_0 &= \frac{(b_2 - b_1)}{1/a_2 - 1/a_1} \\ y_0 &= \frac{-x}{a_1} + b_1 \\ r &= \sqrt{(x_1 - x_0)^2 + (y_1 - y_0)^2} \end{aligned}$$

Une fois obtenue l'équation du cercle qui maximise le nombre de points considérés comme valides, nous

appliquons une régression circulaire [10][12] afin de minimiser l'erreur au sens des moindres carrés.

Afin de tester cette méthode, nous avons généré en simulation un nuage de points répartis aléatoirement autour d'un cercle (rayon = 1 m ; $\sigma=0.01m$).

Les premiers essais ont montré une forte sensibilité de la méthode en fonction de la répartition des points. Les points issus du lidar ne sont pas répartis uniformément autour du cercle mais, comme l'illustre la Figure 3, sur un quart de cercle uniquement. Une estimation erronée du rayon entache directement l'erreur de positionnement (Figure 7). Pour pallier ce problème, nous avons modifié l'algorithme de régression circulaire pour n'estimer que le centre. En effet, le rayon étant une constante, ne plus l'estimer en continu améliore la robustesse de l'algorithme.

TABLE II. ERREURS ENTRE LE CENTRE ESTIMÉ DU CERCLE DE LA PILE D'ÉOLIENNE ET LE CENTRE DE RÉFÉRENCE AVEC OU SANS ESTIMATION DU RAYON AVEC DES POINTS SUR LA TOTALITÉ OU SUR ¼ DU CERCLE

Erreur (m) (pour un rayon de 1m, 100 tirages)	Sans estimation de rayon	Avec estimation de rayon
	Erreur moyenne (écart-type)	Erreur moyenne (écart-type)
Points sur la totalité du cercle	0.0024 (0.0018)	0.0024 (0.0018)
Points sur ¼ du cercle	0.0031 (0.0025)	0.0143 (0.0095)

Comme le montre la Table II, l'estimation du rayon n'induit pas d'erreur tant que les points sont équitablement répartis sur le cercle. Dans le cas réel où le lidar a un champ de vue sur un quart de la pile, l'erreur augmente fortement. Cette méthode améliore d'un facteur supérieur à quatre l'estimation du centre.

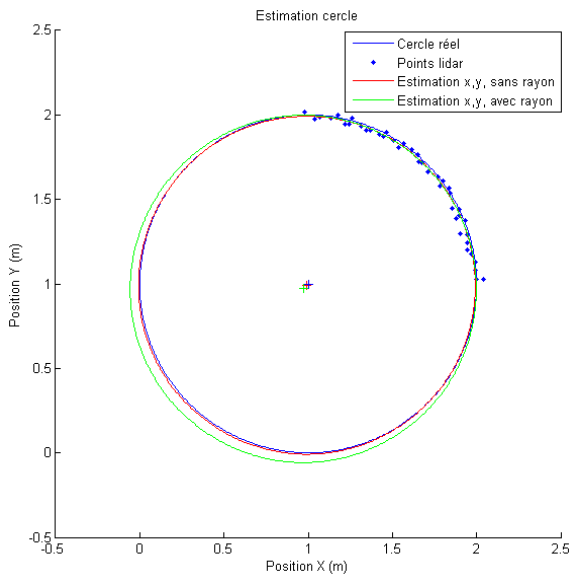


Figure 7 : Estimation de la position du cercle lorsque les points de mesure sont répartis sur ¼ de cercle uniquement. Le cercle en vert correspond à l'estimation de la position et du rayon du cercle, celui en rouge lorsque le rayon n'est plus estimé.

La Figure 8 montre pour 100 tirages les erreurs de distance avec ou sans estimation du rayon. Le fait de supprimer une inconnue dans la minimisation de la régression circulaire,

augmente fortement la précision des deux autres paramètres estimés (x, y).

Suite à ces premiers résultats, l'algorithme global dans sa phase d'accroche se déroule en deux étapes : la première étape est une phase d'initialisation, où une estimation complète (position et rayon de l'éolienne) est réalisée. Un filtre passe bas permet alors d'extraire une estimation filtrée du rayon. Une fois cette valeur suffisamment stable, elle est conservée comme constante. Lors de la seconde phase, seule la position du centre de l'éolienne est estimée.

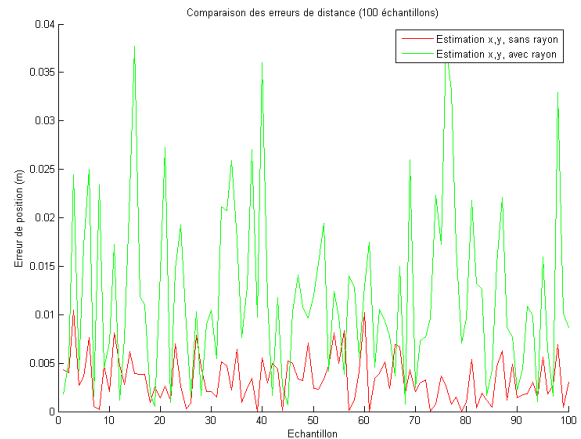


Figure 8 : Erreur de distance sur 100 tirages

Dans notre application, les mouvements du navire induisent une inclinaison du lidar. L'intersection du plan formé par sa nappe avec le cylindre de l'éolienne ne formera donc pas un cercle mais une ellipse que l'on peut représenter par l'équation :

$$\frac{(x - x_0)^2}{a^2} + \frac{(y - y_0)^2}{b^2} = 1 \quad (2)$$

ce qui nécessiterait le tirage de cinq points au lieu de trois. Cependant, la position des foyers étant variable en fonction de l'inclinaison du lidar, il ne sera pas possible de les fixer comme dans le cas de l'estimation du rayon. Nous n'avons pas retenu cette méthode et avons privilégié une approche consistant à projeter les points lidar dans un plan horizontal à partir des informations d'attitude fournies par la centrale inertielle.

3.3 Evaluation avec un simulateur 3D

Afin d'évaluer l'algorithme dans des scénarios réalistes et en temps réel, nous avons mis en œuvre une chaîne complète de simulation associant le simulateur ProSivic et le middleware RTMaps. Le navire est animé avec les mêmes mouvements de mer que ceux utilisés pour l'évaluation des centrales (Figure 4). La passerelle simulée est de type tourelle et échelle télescopique (Figure 9).

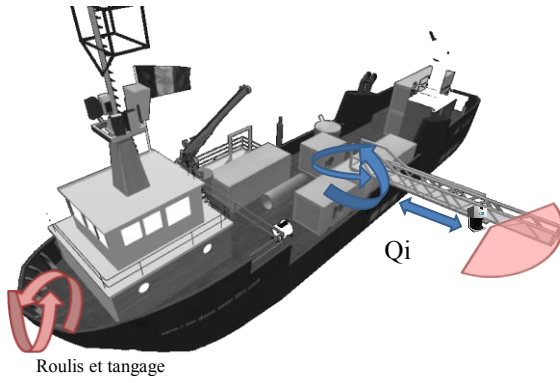


Figure 9 : Dans le simulateur, les mouvements de roulis et tangage du navire sont mesurés par une centrale inertielle, les variables articulaires Q_i représentent les actionneurs de la passerelle et le lidar est positionné à l'extrémité de la partie fixe de la passerelle.

En utilisant un modèle 3D plus réaliste de la pile d'éolienne (présence d'une échelle), on constate que la mesure de position du centre de l'éolienne est perturbée, le plan du lidar intersecte un barreau de l'échelle. Le meilleur cercle ne correspond plus à la pile de l'éolienne car de nombreux points utiles sont masqués par les objets devant le tube (Figure 10).

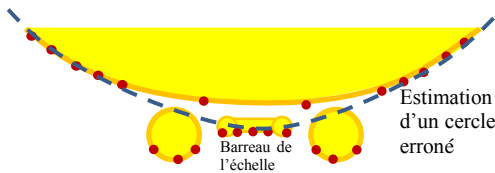


Figure 10 : Le problème du barreau d'échelle : estimation d'un cercle erroné passant par un barreau d'échelle, la pile étant dans son ombre.

Il se produit alors un saut de position du centre qui représentera une forte perturbation pour le système de contrôle-commande. L'algorithme calcule l'erreur au sens des moindres carrés entre le cercle estimé et les points lidar retenus par le Ransac. Cette valeur discrimine correctement les mauvaises estimations (Figure 11). Un filtre de Kalman [9] est donc employé pour faire le suivi 2D de la position du centre de l'éolienne [11]. Le vecteur d'état à estimer est composé avec la position et la vitesse du centre de l'éolienne. Pour la transition entre deux états successifs (eq. 3), nous supposons la vitesse constante et la position est intégrée en faisant le produit de la vitesse par le temps d'échantillonnage t_s . L'équation de mesure (eq. 4) est renseignée par les données de position uniquement.

$$\text{Vecteur d'état } x = \begin{bmatrix} x \\ y \\ \dot{x} \\ \dot{y} \end{bmatrix}$$

$$x_k = Ax_{k-1} + w_k \text{ où } A = \begin{bmatrix} 1 & 0 & t_s & 0 \\ 0 & 1 & 0 & t_s \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

Equation de mesure :

$$z_k = Hx_k + v_k \text{ où } H = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

L'erreur entre le cercle estimé et les points retenus par le Ransac sera directement utilisée comme bruit v_k dans l'équation de mesure (4), ce qui permet au filtre d'ajuster la confiance entre le modèle et les données issues du Ransac.

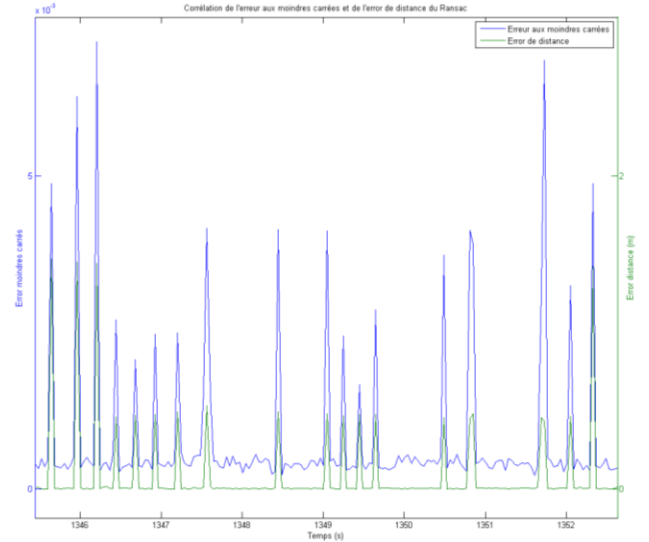


Figure 11 : Corrélation entre l'erreur aux moindres carrés (bleu) et l'erreur de distance à la sortie du ransac (vert).

4 Performances globales de la chaîne de perception

Afin d'analyser les performances de notre méthode, nous avons comparé les résultats avec et sans filtre de Kalman. Sur la Figure 12, nous voyons que le Ransac produit des artefacts (dus entre autre aux barreaux de l'échelle) qui sont corrigés avec le filtre de Kalman comme l'illustre la Figure 12.

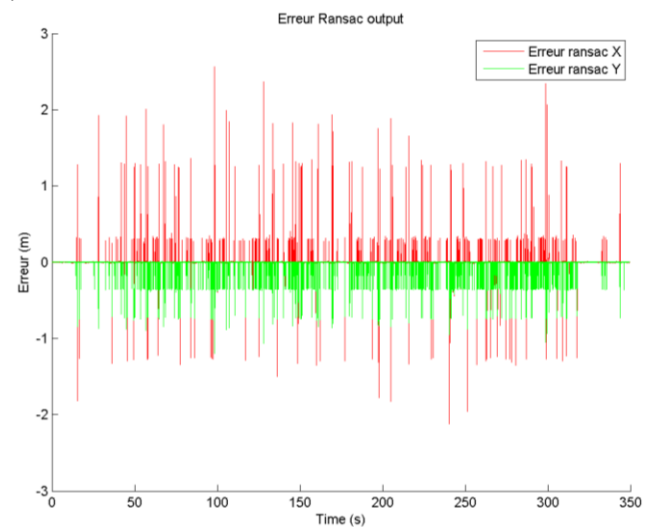


Figure 12: Erreur de positionnement à la sortie du Ransac pour X et Y : l'erreur est importante et incompatible avec le contrôle de la passerelle.

Pour faciliter la comparaison, nous avons calculé la norme de l'erreur de distance, qui représente la distance entre la position réelle de l'éolienne et le centre estimé.

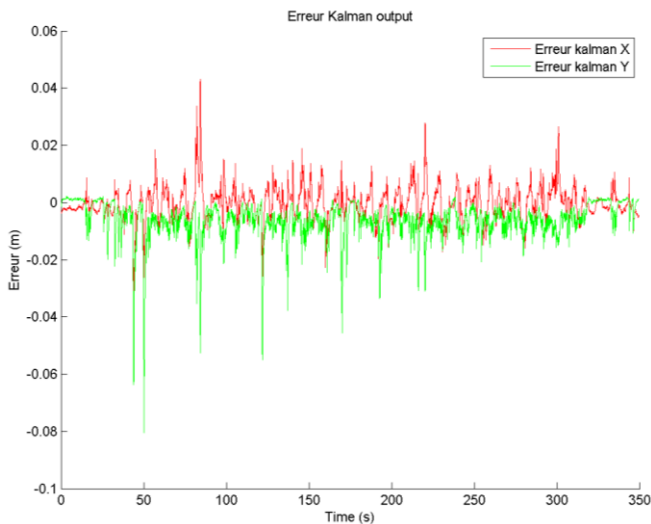


Figure 13 : Erreur de positionnement à la sortie du filtre de Kalman : le filtre lisse les points en limitant la vitesse de déplacement du centre de l'éolienne.

TABLE III. COMPARAISON DE LA PRECISION EN FONCTION DE L'ETAT DE MER

Erreur de distance en mètres	Hauteur spécifique 2.5m Erreur Moyenne (écart type)	Hauteur spécifique 4m Erreur Moyenne (écart type)
Sortie Ransac	0.06347 (0.051236)	0.069153 (0.059956)
Sortie Kalman	0.0080851 (4.8942e-05)	0.0088713 (5.41e-05)

La Table III montre que les algorithmes ne sont pas sensibles à l'état de mer, c'est-à-dire que l'amplitude et la vitesse des mouvements subis ont peu d'effets sur la précision des mesures. Pour la suite de l'étude, nous utiliserons l'état de mer de Hauteur Spécifique (Hs) de houle 2.5m, ce qui correspond à notre cas d'application.

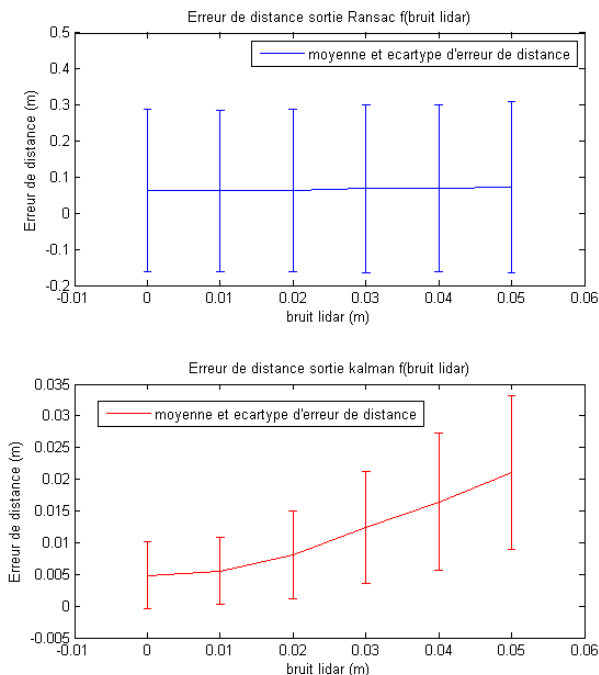


Figure 14 : Erreur de distance en fonction du bruit lidar : en bleu la sortie du Ransac, en rouge la sortie du Kalman

La Figure 14 représente l'erreur de distance en fonction du bruit sur les mesures lidar. La sortie du Ransac n'est pas

affectée par le bruit lidar car les artefacts dus aux problèmes des barreaux d'échelles sont prédominants (Figure 12). Par contre, une fois les données de position filtrées par le Kalman, le bruit lidar se retrouve sur la moyenne et l'écart type en sortie d'algorithme.

Pour notre cas d'application (Hs 2.5m) et bruit lidar d'environ 2cm, nous obtenons une précision moyenne de 8mm de positionnement avec un écart type de 7mm.

D'un point de vue performance, l'ensemble des traitements est effectué en temps réel à partir de données Lidar à 25Hz, en utilisant 6% d'un des cœurs d'un Intel i7-2640M @ 2.8GHz avec le middleware RTMaps. Une vidéo permettant d'illustrer notre problématique et les résultats obtenus est disponible à l'adresse suivante :

<http://www.youtube.com/watch?v=5yUvnkWEVDA>

5 Conclusion

Grâce à l'association d'un algorithme Ransac et d'un filtre de Kalman, nous avons pu développer un algorithme de positionnement d'une éolienne fournissant la précision nécessaire au débarquement sûr du personnel travaillant dans l'éolien offshore et suffisamment robuste aux artefacts. Ces données de positionnement serviront au contrôle de la chaîne cinématique de la passerelle.

Remerciements

Cette étude a été co-financée par l'ADEME dans le cadre du projet Navire du Futur NAVALIS et par la société ACEBI.

Bibliographie

- [1] Ampelmann <http://www.ampelmann.nl/products/>
- [2] OSBV Offshore solutions
- [3] Uptime <http://www.uptime.no/>
- [4] Momac <http://www.momac-robotics.de/momac-Offshore-Access-System-MOTS.html>
- [5] Houlder <http://houlderltd.com/>
- [6] Osbit http://www.osbitpower.com/t12_t18.html
- [7] Arck Sirrah LS08 : <http://www.arck-sensor.com/?q=products/steel/sirrah/ls08>
- [8] Sick, Long range distance sensors DMT
- [9] R.E. Kalman, "A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems", in Transactions of the ASME - Journal of Basic Engineering, vol 82,1960, p. 35-45
- [10] D. Umbach & K. N. Jones, « A Few Methods for Fitting Circles to Data », in IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 52, n° 6, 2003, p. 1881-1885
- [11] R. Branko & A Sanjeev & G. Neil James, "Beyond the Kalman filter: Particle filters for tracking applications", in Artech House Publishers 2004, p89
- [12] D. Gruntz, "Finding the Best Fit Circle", in The MathWorks Newsletter, vol. 1, 1990, p. 5
- [13] M.A. Fischler, & R.C. Bolles, "Random sample consensus : A paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography", in Communications of the ACM, vol. 24, 1981, p. 381-395
- [14] A. Guignamard, "Ekinox, Test Report", SGB Systems 2013
- [15] Chaumette, F., & Hutchinson, S. "Visual servo control. I. Basic approaches" in Robotics & Automation Magazine, 2006, IEEE, 13(4), p82-90.
- [16] Chaumette, F., & Hutchinson, S. "Visual servo control, Part II: Advanced approaches". IEEE Robotics and Automation Magazine, 2007 14(1), p109-118.
- [17] The European offshore wind industry - key trends and statistics 2012, EWEA, janv. 2013
- [18] Sick, "Sensors and solutions for ports, Higher efficiency and greater safety", 2007