

Essais en bassin du comportement dynamique d'une éolienne flottante sous l'action conjuguée de la houle et du vent

Adrien Courbois^{a,b}, Félicien Bonnefoy^a, Jean-Marc Rousset^a, Pierre Ferrant^a, Jean-Luc Toularastel^a, Olivier Flamand^b, Xavier Légaré^a

a. Laboratoire de recherche en Hydrodynamique, Énergétique et Environnement Atmosphérique (LHEEA)
b. Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB)

Résumé :

Ce travail porte sur l'étude expérimentale du comportement dynamique d'une éolienne offshore flottante sous l'action conjuguée de la houle et du vent. Pour cela, un nouveau moyen d'essai permettant la génération de vent a été développé sur le bassin de génie océanique de l'École Centrale de Nantes. Dans un second temps, un modèle réduit d'éolienne flottante a été dimensionné à l'échelle du 1/50^e suivant une méthodologie adaptée à ce type d'essai. Cette maquette a ensuite été étudiée en bassin afin de caractériser son comportement sous l'action de la houle et du vent.

Abstract :

This study deals with an experimental simulation of the dynamic behaviour of a floating wind turbine under simultaneous wind and wave loads. For that purpose, we developed a new experimental device which allows wind generation on the ocean engineering wave basin of École Centrale de Nantes. In a second phase, a scale model of a floating wind turbine was designed with a 1 :50 length scale, following methodology specific to this kind of study. This scale model has then been studied to obtain its dynamic behavior under wind and wave loads.

Mots clefs : Éolienne flottante, Aérodynamique, Hydrodynamique

1 Introduction

Il s'agit ici d'étudier en bassin le comportement aéro-hydrodynamique d'une éolienne flottante, sujet nouveau pour le Laboratoire de recherche en Hydrodynamique, Énergétique et Environnement Atmosphérique (LHEEA). Pour cela, il a fallu dimensionner un système permettant la génération de vent sur le bassin de houle de l'École Centrale de Nantes et mettre en oeuvre une méthodologie d'essai adaptée à ce type d'étude. Ces essais ont également permis de valider un code numérique développé en interne ([7]). Ce travail de recherche (voir [3] pour plus d'informations) s'inscrit donc dans une volonté de développement de la thématique éolien flottant pour le laboratoire.

2 Développement d'un générateur de vent

2.1 Principales caractéristiques

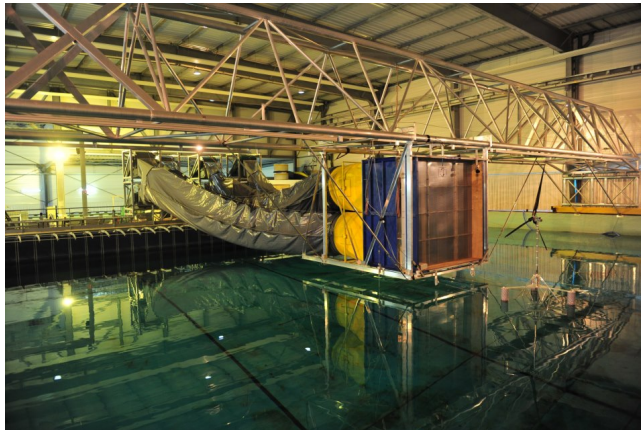
Le principe de génération de vent est le même que celui développé dans [2]. Cependant, comme on peut le voir sur la figure 1a, le nombre de ventilateur et la dimension de la buse de soufflage ont augmenté pour pouvoir travailler avec une échelle géométrique plus grande pour la maquette. On diminue ainsi les problèmes liés au règles de similitude.

L'utilisation de ventilateurs centrifuges permet d'éviter la génération d'un flux vrillé propre aux ventilateurs axiaux généralement choisis pour ce type d'essai ([6], [5], ...). L'écoulement d'air est conduit

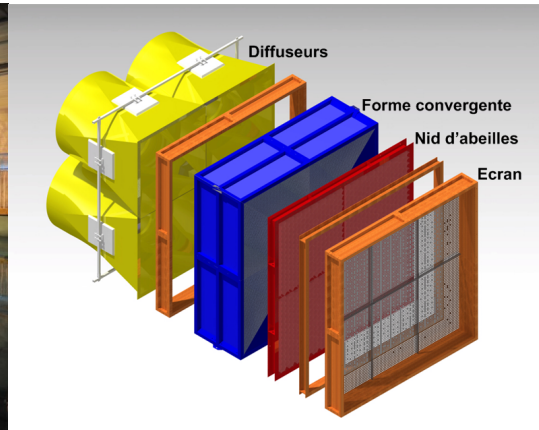
à proximité de la maquette par le biais de gaines. Ces gaines ont été choisies souples pour des raisons évidentes de poids mais aussi de modularité. La connection entre les gaines circulaires et la buse de soufflage rectangulaire nécessite une pièce de transition appelée ici diffuseur.

Dans cette configuration, 8 ventilateurs centrifuges sont utilisés et la dimension de la buse de soufflage est de 2800 mm × 2800 mm.

Comme pour une soufflerie, un écran et un nid d'abeille ont été utilisés (figure 1b) afin d'améliorer la qualité de l'écoulement (voir [3] pour plus d'informations). De plus, ces éléments introduisent naturellement des pertes de charge nécessaires au bon gonflement des gaines souples. Une "forme convergente" est également placée dans la buse de soufflage pour rajouter de la quantité de mouvement au centre du jet (voir [3] pour plus d'informations).



(a) Photographie du générateur de vent



(b) Vue éclatée de la buse de soufflage

FIGURE 1 – Générateur de vent

2.2 Qualification expérimentale de ce nouveau moyen d'essai

Le générateur de vent a été qualifié sur le bassin de houle de l'Ecole Centrale de Nantes par le biais d'anémomètres soniques. Une cartographie de la vitesse moyenne et de l'intensité turbulente longitudinale (figure 2) a été obtenue 2 m en aval de la buse de soufflage (matérialisé par le rectangle noir). La vitesse du vent est ici adimensionnée par la vitesse obtenue par un anémomètre de référence placé dans le coin de la buse de soufflage et visible sur la figure 3b.

Le cercle bleu représente la surface décrite par la turbine le long de sa rotation. L'homogénéité de vitesse moyenne dans cette zone est tout à fait satisfaisante. L'action du convergent (représenté par les lignes noires en trait fin) est visible car on n'observe pas de déficit de vitesse au centre du jet. Le taux de turbulence est inférieur à 3% au centre du jet, ce qui est très faible pour ce type d'installation. Tous ces résultats prouvent la pertinence des artifices utilisés pour diminuer le taux de turbulence et homogénéiser l'écoulement (forme convergente, nid d'abeille, écran).

3 Dimensionnement de la maquette

3.1 Choix du modèle

Pour ces essais en bassin, nous avons choisi d'utiliser la plateforme Dutch Tri-floater [1]. Ce flotteur est constitué de trois colonnes reliées par des bras de liaison afin de rigidifier la structure. L'ajout de ballast en pied de colonne permet d'augmenter la stabilité de ce type de système. Les jupes que l'on distingue dans la partie basse de la structure sur la figure 3b permettent d'augmenter la masse d'eau ajoutée et d'apporter un amortissement visqueux supplémentaire. Ce type de dispositif permet de réduire considérablement les mouvements en pilonnement, roulis et tangage du système. Les caractéristiques principales sont regroupées dans le tableau 1.

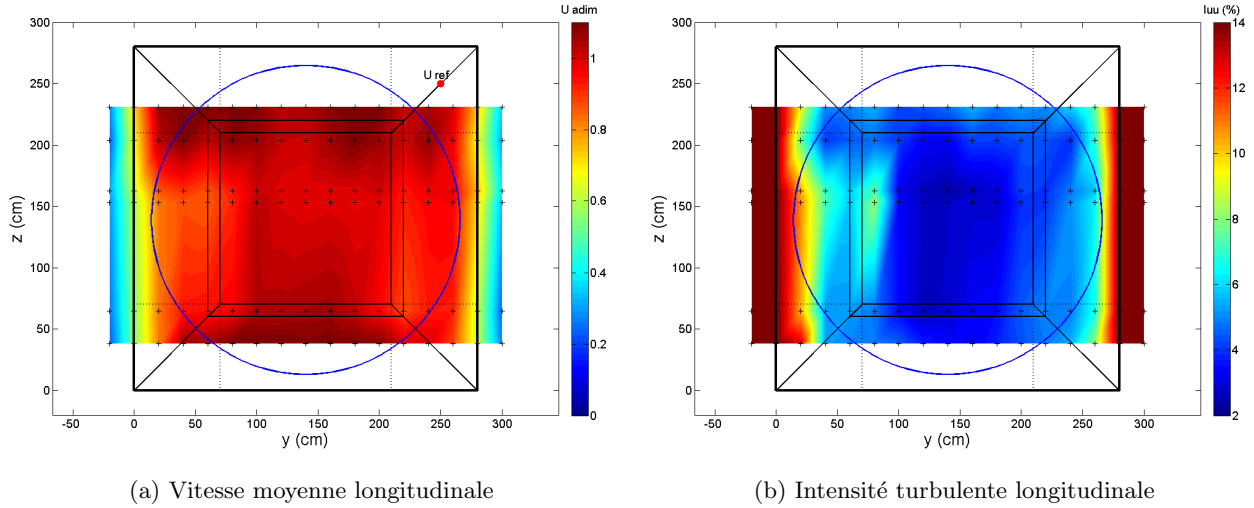


FIGURE 2 – Cartographie de vitesse moyenne et d'intensité turbulente 2 m en aval de la buse de soufflage

TABLE 1 – Caractéristiques principales du Dutch Tri-floater

Diamètre des colonnes bouées	8 m
Hauteur des colonnes bouées	24 m
Distance entre les cylindres bouées	68 m
Masse totale	1668 t

Pour la turbine, l'éolienne NREL 5MW a été choisie [4]. Il s'agit d'un prototype générique d'éolienne tripale de puissance 5 MW orientée amont. Les principales propriétés de cette éolienne sont regroupées dans le tableau 2. La tour de cette éolienne a été légèrement modifiée de façon à prendre en compte les caractéristiques du flotteur.

TABLE 2 – Propriétés générales de l'éolienne NREL 5MW

Diamètre Rotor, Moyeu	126 m, 3 m
Hauteur du moyeu (/rt à SL)	90 m
Vitesse nominale	11.2 m s ⁻¹
Vitesse de rotation nominale	12.1 rpm

3.2 Échelle géométrique

L'échelle géométrique est ici déterminée par rapport aux caractéristiques aérodynamiques du générateur de vent (figure 2). On a donc fixé l'échelle géométrique suivante :

$$\lambda = \frac{1}{50}$$

Il a été vérifié que la génération de houle soit compatible avec ce type d'échelle.

Sur la figure 3b, on peut voir la maquette de l'éolienne flottante au premier plan sur le bassin de houle de l'École Centrale de Nantes. Ce bassin a pour dimensions 50 m de longueur, 30 m de large et 5 m de profondeur. Le batteur, composé de 48 volets indépendants, permet de créer des houles régulières ou irrégulières, uni-directionnelles ou multi-directionnelles jusqu'à 1 m de hauteur. Ces volets sont visibles en bleu, au fond du bassin. Le générateur de vent est également visible sur cette même photographie.

Les principales caractéristiques géométriques de la maquette sont regroupées dans le tableau 3.

TABLE 3 – Comparaisons entre les valeurs mesurées pour la maquette (expérience) et les valeurs théoriques du prototype à l'échelle du 1/50^e

	Prototype (Échelle 1/50)	Expérience
Masse du flotteur	13.68 kg	13,54 kg
Masse totale (avec les câbles d'instrumentation)	19.24 kg	19.52 kg
Longueur d'une pale	1.23 m	1,22 m
Masse d'une pale	145 g	135 g

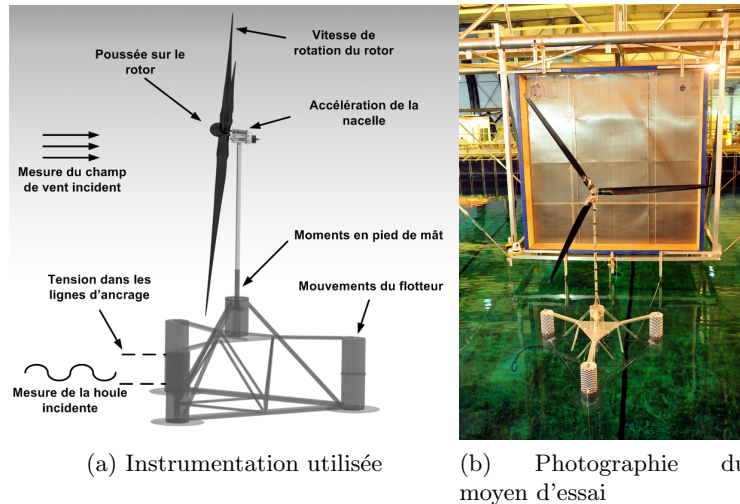


FIGURE 3

3.3 Méthodologie et instrumentation

La méthodologie choisie pour cette étude est basée sur la similitude de Froude. Afin de simuler correctement le comportement du système, les longueurs, les masses, les principaux moments d'inertie et la position du centre de gravité de chaque sous-système (flotteur, tour, nacelle, rotor) ont été respectés. En conséquence les caractéristiques géométriques du système total sont correctement modélisées. Le modèle a également été voulu aéroélastique par le respect du premier mode de flexion de la tour (plus de détails disponibles dans [3]).

Dans cette expérience, le vent met en rotation l'éolienne mais la vitesse de rotation de la turbine est fixée par un moteur afin de respecter le facteur d'échelle en fréquence imposé par la similitude de Froude. Comme les coefficients de traînée et de portance des pales sont fortement dépendant du nombre de Reynolds, nous avons choisi de reproduire la poussée sur le rotor et non la vitesse du vent. On obtient ainsi le bon angle d'assiette et donc un comportement dynamique correct du système autour de cet angle d'assiette.

La figure 3a récapitule l'ensemble des valeurs physiques mesurées lors de l'expérience.

4 Essais en bassin

4.1 Configurations d'essai

L'ensemble des cas d'étude développés lors de ces essais est résumé dans le tableau 4. Seuls seront présentés ici les résultats obtenus en houle régulière avec et sans vent sous la forme de RAOs (Response Amplitude Operator). Il s'agit en fait de déterminer la fonction de transfert du système à étudier.

Les RAOs sont classiquement tracées à cambrure constante. L'amplitude des mouvements est adimensionnée par l'amplitude de la houle incidente A .

$$RAO_i = \frac{A_i}{A}$$

Avec A_i , l'amplitude de réponse du i^e degré de liberté (roulis, tangage, lacet, cavalemt, embardée et pilonnement) et A l'amplitude de la houle incidente. Une RAO représente donc la réponse du système pour une houle d'amplitude unitaire.

TABLE 4 – Résumé des différents tests effectués

Qualification des ancrages
Essais d'extinction sans vent et avec vent constant
Houle régulière sans vent et avec vent constant
Houle irrégulière sans vent et avec vent constant
Houle irrégulière avec spectre de vent marin
Houle et vent croisés

4.2 Analyse du comportement dynamique du système avec et sans vent

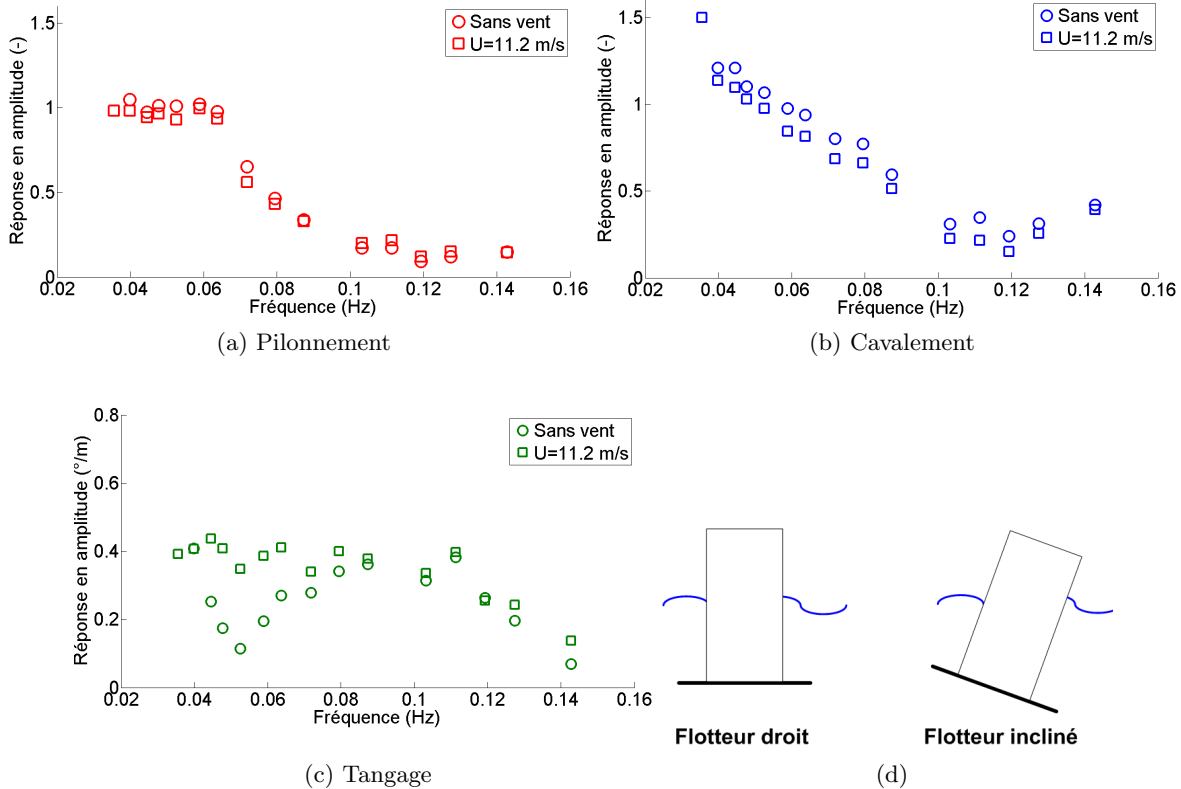


FIGURE 4 – RAOs avec (□) et sans vent (○)

Nous avons tracé sur la figure 4 les RAOs obtenues avec des houles régulières avec vent ($U=11.2$ m/s, □) et sans vent (○) pour les mouvements de cavalemt, pilonnement et tangage.

On observe une augmentation importante de la réponse en pilonnement avec la période. Aucun phénomène résonant n'est observé à la fréquence propre en pilonnement du fait de l'amortissement important apporté pas les jupes. A grande longueur d'onde, le flotteur "bouchonne" (distance constante entre le haut de la bouée et la surface libre). Cela se traduit par un mouvement de pilonnement en

phase avec la houle incidente et une amplitude pour ce degré de liberté proche de l'amplitude de houle. Le vent n'a que très peu d'influence sur les oscillations en pilonnement.

En revanche, l'influence du vent sur les mouvements de cavement et tangage est bien présente :

- Pour le cavement, on observe une diminution de l'amplitude des oscillations avec vent.
- Pour le tangage, on ne retrouve pas le minimum local présent dans le cas sans vent et l'amplitude des oscillations a considérablement augmenté.

Cette modification du comportement du système s'explique par une modification du comportement hydrodynamique du flotteur et notamment des jupes du fait de l'angle d'assiette (figure 4d).

5 Conclusions

Ce papier présente le développement d'une campagne d'essai dont le but est d'étudier le comportement dynamique d'une éolienne flottante sous l'action conjuguée de la houle et du vent. Dans ce but, un dispositif de génération de vent a été développé et installé sur le bassin de houle de l'École Centrale de Nantes. L'éolienne flottante étudiée est basée sur l'éolienne NREL 5MW et le Dutch-Tri floater à l'échelle du 1/50^e. On observe un effet du vent sur les mouvements de cavement et tangage qui s'exprime principalement par la modification du comportement hydrodynamique de la maquette du fait de l'inclinaison de cette dernière sous l'effet du vent.

6 Remerciements

Les auteurs voudraient remercier la Région Pays de la Loire pour avoir financé la thèse de doctorat qui a donné lieu à cette étude. Nous aimerions également remercier Stéphane Lambert, Laurent Davoust, Matthieu Weber, Virginie Baudry et Pierre-Emmanuel Guillerm pour leur contribution au projet.

Références

- [1] Bulder, H. and Henderson, H. and Pierik, S. and Wijnants, W. 2002 Studie naar haalbaarheid van en randvoorwaarden voor drijvende offshore windturbines (translation : Study of the feasibility and boundary conditions of floating offshore wind turbines) *TNO Report 2002-CMC-R043, Netherlands*
- [2] Courbois, A. and Ferrant, P. and Flamand, O. and Rousset, J.M. and Toularastel, J.M. 2011 Innovative design of a wind generation system for marine structures model testing *International Society of Offshore and Polar Engineers, 19-24 June 2011, Maui, Hawaii*
- [3] Courbois, A. 2013 Etude expérimentale du comportement dynamique d'une éolienne offshore flottante soumise à l'action conjuguée de la houle et du vent *Thèse de doctorat soutenue le 18 Avril 2013 à l'École Centrale de Nantes*
- [4] Jonkman, J. and Butterfield, S. and Musial, W. and Scott, G. 2009 Definition of a 5-MW reference wind turbine for offshore system development *National Renewable Energy Laboratory, NREL/TP-500-38060*
- [5] Koo, B. and Goupee, A. and Lambrakos, K. and Kimball, R. 2012 Model tests for a floating wind turbine on three different floaters *Proceedings of the ASME 2012 31st International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*
- [6] Nielsen, F.G. and Hanson, T.D. and Skaare, B. 2006 Integrated dynamic analysis of floating offshore wind turbines *ASME*
- [7] Philippe, M. 2012 Couplages aéro-hydrodynamiques pour l'étude de la tenue à la mer des éoliennes offshore flottantes Ecole Centrale de Nantes *Thèse de doctorat soutenue le 26 Octobre 2012 à l'École Centrale de Nantes*