

Thèse : Interactions fluide/structure et Amortissement du pilonnement des éoliennes flottantes

Dirigée par Luc Pastur¹ et co-encadrée par Rémi Carmigniani² et Sébastien Boyaval²

¹Unité de Mécanique, ENSTA Paris

²LHSV, Ecole des Ponts ParisTech

Mots clés : éolien flottant, vagues, pilonnement, interaction fluide-structure, mécanique des fluides, expériences, conceptions

Contexte, positionnement et objectifs:

L'énergie éolienne apparaît comme la source d'énergie renouvelable la plus prometteuse. En 2019, 417TWh d'énergie éolienne ont déjà été générés en Europe, ce qui représente 15% de la demande en énergie électrique [1]. Pour accélérer sa transition énergétique, l'Union Européenne a fixé comme objectif de porter à 300GW la puissance installée d'éolien en mer d'ici 2050 (contre 12GW en 2020), faisant de l'énergie éolienne, l'énergie marine renouvelable au plus fort potentiel dans le Pacte vert européen. Cet attrait pour l'installation d'éoliennes plus grosses (c'est à dire avec une puissance installée plus importante, voir figure 1) et plus loin des côtes, vient du fait qu'à mesure qu'on s'éloigne des côtes les vents sont plus forts, plus réguliers et (donc) plus prévisibles. Cependant, loin des côtes, il n'est plus possible de poser les éoliennes sur le plancher océanique (comme près du littoral) sans faire exploser le coût de l'installation. Pour rester compétitif, les éoliennes *flottantes* s'imposent. Il reste toutefois des défis technologiques à relever pour déployer la technique en garantissant sa survie aux conditions les plus extrêmes de vent, vagues et courants. Un défi majeur est le *pilonnement*, mouvement vertical des structures flottantes autour de leur équilibre de flottaison qu'on ne peut empêcher par les seuls ancrages [2,3]. La technologie actuelle consiste à poser les éoliennes sur des flotteurs qui amortissent le pilonnement *par conception*, à l'aide de dissipateurs d'énergie. Mais on ne sait pas encore prédire la dissipation d'une structure particulière: il faut encore beaucoup d'essais expérimentaux en Laboratoire. Notre objectif est de progresser sur la conception de flotteurs stables, en validant à la base notre compréhension des mécanismes physiques en jeu.

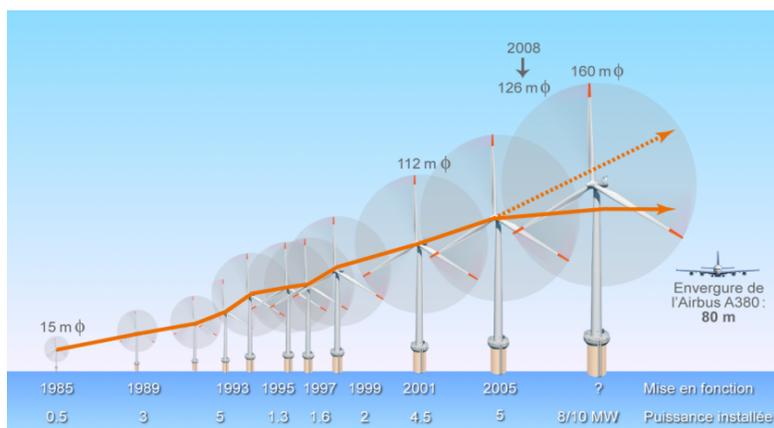


Figure 1 : Évolution de la taille et de la puissance des éoliennes offshore (©Connaissance des Énergies)

Les flotteurs actuels sont typiquement des structures semi-submersibles cylindriques en acier, reliées entre elles par des barres (voir figure 2: *semi-submersible* et *spar*). L'éolienne repose sur une des colonnes ou sur les barres, selon les prototypes. Cette structure doit permettre à

l'éolienne d'extraire l'énergie du vent en restant suffisamment stable sur un champ de vagues potentiellement très fort en pleine mer, avec un courant et des vents importants. Les technologies actuellement à l'étude partent des connaissances acquises pour les plateformes pétrolières off-shores, car les conditions de mer sont similaires. Mais les dimensions de ces structures sont très différentes : typiquement 300 m contre 50 m de large, et 100 ktonnes contre 1 ktonne ! Or, les technologies d'amortissement du pilonnement ont été validées avec une composante empirique importante, qu'on ne sait pas transférer directement aux nouvelles échelles considérées (par analyse dimensionnelle et calcul numérique [3]).



Figure 2 : Les différents prototypes d'éoliennes flottantes (source : windpowerengineering.com)

L'un des buts de l'étude est de concevoir une structure dont la fréquence de résonance propre est en dehors de la gamme de fréquences des vagues du site. Il faut ensuite chercher à maximiser la dissipation de la structure flottante aux mouvements verticaux. En d'autres termes, il faut augmenter la période d'oscillation propre de la structure et amplifier la génération de tourbillons (ou vortex) par la colonne oscillant dans l'eau. Une solution consiste à utiliser des plaques anti-pilonnement ou *heave plates* (voir figure 3). La forme (circulaire, hexagonale avec ou sans jupe...), la porosité (pleine, trouée), le nombre et les différentes dimensions de ces plaques varient grandement d'un prototype à l'autre, soulignant encore le caractère empirique des connaissances sur le sujet. Les études se limitent aussi souvent à des mesures avec un forçage de l'oscillation [2-4] et donc sans couplage direct avec les vagues. Récemment encore, Thiagarajan et Moreno (2020) [5] ont montré que les vagues influencent grandement les coefficients de dissipation, et que les études existantes ne sont pas directement transférables. Les rares études s'intéressant au couplage avec les vagues se limitent à des modèles très réduits d'éoliennes flottantes, dans des conditions peu adaptées aux multiples échelles [5,6] (il y a trop de nombres adimensionnels à préserver). Le couplage vague et courant ne semble pas exploré. Le problème, difficile, est très risqué pour les industriels ! Sa résolution nécessite l'acquisition patiente de connaissances fondamentales. D'autre part, c'est aussi un enjeu clef face à la concurrence, et le sujet semble encore peu connu des académiques.

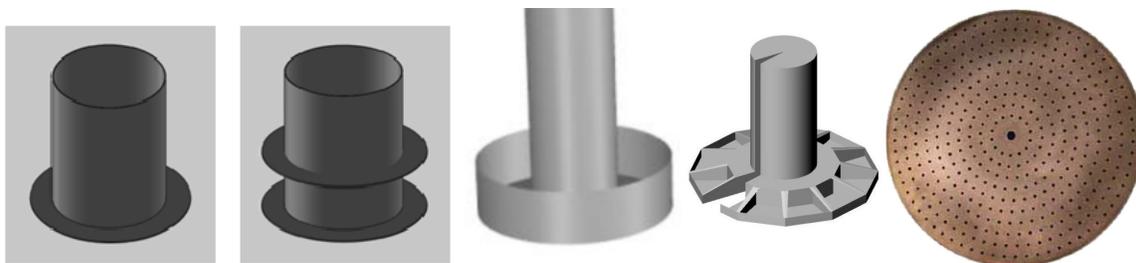


Figure 3 : Exemples de différentes technologies de *heave plates*. De droite à gauche : simple disque, double disque, disque simple avec jupe, disque avec jupe et renforcement, disque poreux.

Dans ce contexte, notre sujet de thèse vise à identifier des technologies d'amortissement du pilonnement en développant d'abord les connaissances manquantes sur la physique du couplage de structures dans un champ de vagues. Nous cherchons à répondre à la question suivante : comment amortir les oscillations d'un ou plusieurs flotteurs dans un champ de vagues et de courant en vue d'identifier de nouveaux concepts stables d'éoliennes offshore ? En analysant par étapes successives les différents éléments de couplage entre la structure flottante et le fluide environnant, nous ambitionnons de refonder les études en cours pour les éoliennes flottantes et d'explorer de nouveaux concepts d'amortisseurs, éventuellement sans lien direct avec les technologies conservatrices étudiées actuellement. Nos études fondamentales sur les interactions fluide-structure flottante dans le contexte marin serviront aussi à d'autres applications en génie maritime : des structures flottantes, avec ancrages, et plus petites que les plates-formes pétrolières, restent aussi à concevoir pour de multiples usages nouveaux en pleine mer, pour l'extraction de l'*énergie des vagues* par exemple.

Verrous scientifiques :

Le sujet de la thèse part du constat qu'un verrou technologique (l'amortissement du pilonnement des éoliennes flottantes en cours de développement) est en fait aussi un verrou scientifique : comprendre les interactions fluide-structure qui permettraient de relier les connaissances empiriques sur les plates-formes pétrolières (grandes échelles) aux connaissances en cours de développement sur les éoliennes flottantes (petites échelles).

Des modèles existent pour les grandes échelles, qui décrivent bien aujourd'hui les plates-formes pétrolières, mais au prix d'empirismes en ce qui concerne le couplage avec les échelles plus petites. Or, les connaissances actuelles sur la création de tourbillons ne permettent pas d'adapter directement les modèles aux petites échelles : il faut soit recourir à de nombreuses observations additionnelles, soit progresser dans la compréhension des mécanismes dissipatifs, afin de n'en sélectionner qu'un sous-ensemble bien choisi. C'est ce deuxième choix que nous faisons, afin de lever un verrou scientifique (création de tourbillons) qui permettrait aussi de lever un verrou technologique (ouvrir de nouveaux horizons à l'amortissement du pilonnement des éoliennes offshore en cours de développement).

Le sujet est difficile, car de nombreux paramètres semblent liés entre eux aux petites échelles. Le risque de ne pas aboutir à une théorie satisfaisante est toutefois compensé par l'acquisition de connaissances expérimentales nouvelles, moins risquées et clairement publiables.

Programme scientifique et technique :

- **Étape 1 : Étude expérimentale 2D avec et sans vagues, régulières et irrégulières (~12 mois)**

La thèse débutera d'abord par l'étude d'un cas simplifié. Ceci permettra de mettre en place des lois simples sur l'impact des plaques anti-pilonnement dans une coupe uni-directionnelle de vagues, puis d'identifier les leviers permettant d'amplifier la dissipation. Il s'agit de commencer par un cas 2D (bloc rectangulaire flottant) forcé en pilonnement (vagues réfractées) ou soumis à des vagues seules sans mouvement (vagues diffractées), avant d'étudier le cas couplé (mouvement de pilonnement induit par le champ de vague). Nous étudierons l'impact de différentes technologies de plaque anti-pilonnement sur la dynamique du flotteur. De plus, nous nous intéresserons à la vorticité générée au niveau de ce dispositif.

Pour quantifier les impacts des plaques et l'origine du comportement, des mesures de champ de vitesse seront faites par vélocimétrie par images de particules (PIV), synchronisées à des mesures de forces résultantes et de déplacement du flotteurs. Ces mesures pourront être couplées avec des mesures de hauteurs d'eau et de pression sur la plaque et le flotteur. Cette étude fine des procédés physiques en jeu alimentera en mesures très complètes nos modèles physiques.

Les paramètres qui seront variés sont : la masse linéique du flotteur, la raideur du système (simulant les lignes d'amarrage), sa taille, le type de plaque anti-pilonnement (voir figure 2), la fréquence et l'amplitude des vagues dans le cas de vagues régulières.

- **  tape 2 :   tablissement d'une première théorie analytique (~6 mois)**

Dans la continuité de l'étape 1, nous chercherons à établir un modèle théorique expliquant la dissipation sur les plaques anti-pilonnement. Cette partie pourra s'appuyer également sur des outils numériques au besoin en tirant profit des codes utilisés et développés au sein des Laboratoires.

Le résultat de ces travaux sera une formulation théorique (analytique ou pseudo-analytique) du phénomène physique étudié donnant lieu à des publications dans des revues de mécanique des fluides et/ou d'Ocean engineering (Journal of Fluid Mechanics par exemple).

- **  tape 3 : Expériences et théorie avec un cylindre 3D (~12 mois)**

La troisième étape reprendra la démarche des deux précédentes, avec vagues régulières et irrégulières, sur un cas 3D. Elle consistera à appliquer la même démarche à un cas de cylindre (proche des systèmes type SPAR, voir figure 2). Ici nous pourrons tirer avantage des installations expérimentales du Laboratoire Saint-Venant pour conduire des études à différentes échelles. L   encore, nous viserons une publication dans une revue de mécanique des fluides.

- **  tape 4 :   tude expérimentale de l'impact du couplage courant-vagues (~12 mois)**

L'étape suivante s'intéressera au couplage vague et courant sur la dynamique du flotteur. Les canaux de Chatou permettent de faire ce couplage. Cet ajout complexifie énormément la modélisation étant donné que le courant se couple aux vagues, modifiant les équations de

dispersions des ondes. Nous commencerons encore une fois par le cas 2D dans un premier temps, qui permet d'avoir la perspective de modélisations pilotes simples.

Ce programme est intentionnellement ambitieux: les étapes 1 à 2 pourraient déjà être une très bonne thèse selon les encadrants.

Laboratoire d'accueil et compétences

La thèse se déroulera à la fois à l'Unité de Mécanique (UME) d'ENSTA Paris et au Laboratoire d'Hydraulique Saint-Venant (LHSV) de l'Ecole des Ponts ParisTech et EDF R&D.

L'UME dispose d'un canal à houle (8 m de long, 50cm de large) et d'un hippodrome à surface libre (section d'essais 50 cm x 80 cm) dans lesquelles prendront place les premières expériences de la thèse. Le LHSV dispose de trois canaux à houles et courants allant de 4m (40 cm) à 50m (1m50) de long (de large). L'ensemble de ces installations nous permettra d'explorer une gamme d'échelles rarement étudiée en laboratoire au cours d'une thèse. Le LHSV a également accès à deux bassins à vagues multidirectionnelles permettant des études 3D complètes sur des modèles réduits.

Enfin, les deux Laboratoires regroupent les connaissances théoriques, numériques et expérimentales pour ce genre de problèmes complexes, qui requiert souvent les trois volets au plus haut niveau. Ce sujet de thèse s'inscrit dans la continuité du projet Fricfloat lancé grâce à l'EUR E4C. Le financement de la thèse serait assuré par l'EUR E4C, sous réserve d'attribution d'une bourse.

Direction et co-encadrement de la thèse

La thèse sera dirigée par Luc Pastur (UME) et co-encadrée par Rémi Carmigniani et Sébastien Boyaval (LHSV). Tous trois sont impliqués dans le projet Fricfloat depuis 2020.

- Luc Pastur est Professeur Associé HDR à l'UME d'ENSTA Paris depuis 2017. Son domaine d'expertise est la mécanique des fluides expérimentale et théorique, les écoulements massivement décollés, les instabilités et le contrôle d'écoulements, les modèles réduits.
- Rémi Carmigniani est chercheur au LHSV depuis 2018. Il travaille depuis 7 ans sur l'étude des écoulements à surface libre. Il apporte son expertise sur l'encadrement de la partie expérimentale (mesure PIV, conception d'expériences,...) ainsi que la modélisation par approche potentielle.
- Sébastien Boyaval est chercheur HDR au LHSV depuis 2012 et anime l'équipe de recherche sur le projet Fricfloat. Expert en mécanique numérique (modélisation EDPs et simulation numérique), il développe de nouvelles formulations des efforts internes pour les écoulements complexes utiles à l'hydraulique environnementale, et des méthodes numériques pour le traitement des incertitudes de modélisation.

Profil recherché :

Master 2 Recherche ou équivalent en mécanique des fluides avec si possible une expérience en recherche expérimentale en Laboratoire et une expertise en théorie potentielle des vagues.

Une bonne maîtrise de l'anglais ainsi que des notions d'interaction fluide/structure sont requises.

Contact :

Adresser un CV, une lettre de motivation et un relevé de notes à luc.pastur@ensta-paris.fr et remi.carmigniani@enpc.fr. Une ou des lettres de recommandation seront appréciées.

Références :

- [1] Wind Europe. Wind Energy in Europe in 2019. 2020. Available online: <https://windeurope.org/about-wind/statistics/european/wind-energy-in-europe-in-2019/> (accessed on 10 October 2020).
- [2] Bezunartea-Barrio *et al.* (2019), Scale effects on heave plates for semi-submersible floating offshore wind turbines: case study with a solid plain plate, *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*
- [3] Lopez-Pavon et Souto-Iglesias (2015), Hydrodynamic coefficients and pressure loads on heave plates for semi-submersible floating offshore wind turbines: A comparative analysis using large scale models
- [4] Tao et Dray (2008), Hydrodynamic performance of solid and porous heave plates
- [5] Thiagarajan & Moreno (2020) Wave Induced Effects on the Hydrodynamic Coefficients of an Oscillating Heave Plate in Offshore Wind Turbines, *Journal of Marine Science and Engineering*
- [6] Mello *et al.* (2021) Influence of heave plates on the dynamics of a floating offshore wind turbine in waves, *Journal of Marine Science and Technology*