

# Etude des efforts hydrodynamiques sur une éolienne flottante et de sa réponse structurelle dans des états de mer

IIHNE – LHEEA – Ecole Centrale de Nantes

Février 2024

## 1 Contexte

Des éoliennes flottantes commencent à être installées dans le monde à des stades de prototypes ou de fermes pilotes. En 2024, le plus important parc flottant, Hywind Tampen, se situe en Norvège et est composé de 11 éoliennes de 8 MW. En France, le prototype de BW-IDEOL Floatgen, supportant une éolienne de 2 MW, a été installée sur le site d'essai SEM-REV en 2018, et les trois éoliennes de 8.4 MW du parc pilote Provence Grand Large ont été installées en 2023 au large du Golfe de Fos.

Cette montée en puissance du secteur est accompagnée d'une augmentation de la taille des machines et des flotteurs. Ces gigantesques systèmes flottants sont soumis à des environnements complexes (houles, vent, courant), avec des fréquences propres qui se situent généralement aux basses fréquences (plus basses que les fréquences de vagues) ou au-dessus des fréquences de vagues, selon les degrés de liberté. Dans des états de mers relativement violents, les mouvements peuvent être grands, les chargements hydrodynamiques sont généralement non-linéaires et la structure peut montrer des réponses aux fréquences propres du système et notamment des vibrations significatives de la tour [1]. La plupart des modèles mis en œuvre pour dimensionner ces structures ne permettent pas de bien tenir compte de ces comportements non-linéaires.

Différents outils numériques sont couramment utilisés pour étudier ces systèmes et leurs réponses aux différents états de mer. De fidélité basse ou intermédiaire, ils considèrent souvent des chargements hydrodynamiques calculés sur la base de la théorie potentielle linéaire (avec possible inclusion des termes du second-ordre) et/ou la formulation de Morison. Ces outils supposent généralement une plateforme rigide et ne permettent pas toujours d'accéder directement aux chargements internes dans la structure de la plateforme.

Quelques travaux récents ont étudié les déformations et les chargements internes de la sous-structure dans des calculs couplés, mais ils manquent de données de validation expérimentales.

De nombreuses campagnes expérimentales ont étudié la réponse des éoliennes flottantes en considérant une plateforme rigide et une tour dont la fréquence propre peut être réduite en similitude de Froude. D'autres campagnes, plus rares, se sont intéressées aux chargements internes de la plateforme et/ou à ses déformations [2–4].

Dans ce contexte, le Laboratoire d'Hydrodynamique, d'Energétique et d'Environnement Atmosphérique (LHEEA) de l'Ecole Centrale de Nantes dispose d'installations expérimentales de grandes dimensions permettant l'étude du comportement de structures flottantes, avec notamment un bassin de génie océanique (50m × 30m × 5m). Plusieurs campagnes ont eu lieu sur l'analyse du moment de flexion dans un navire [5,6], et une éolienne flottante de type spar a été largement étudiée avec une plateforme rigide [7] ou flexible [4,8] (voir Figure 1) afin d'étudier les effets des vagues sur les vibrations du système.

Le LHEEA de l'Ecole Centrale de Nantes voit actuellement une forte dynamique de projets de recherche dans le domaine des éoliennes flottantes, avec de nombreuses campagnes d'essais étudiant des éoliennes flottantes dans différentes conditions et sur différents supports. Des recherches en simulation

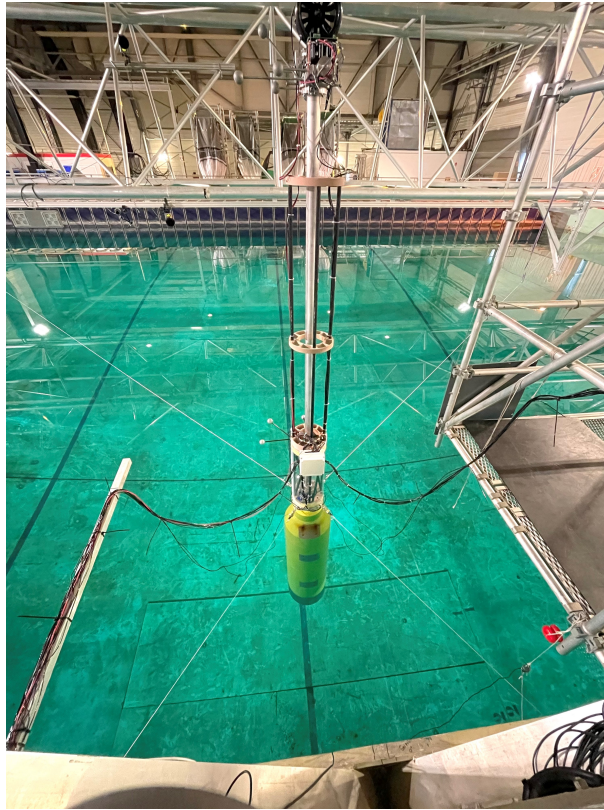


FIGURE 1 – Campagne d'essais du projet HELOFOW dans les bassins de l'ECN [4]

numérique haute fidélité sont aussi en cours. En particulier, cette thèse sera en interaction forte avec deux projets :

- Le projet CARNOT CIMSUB, visant à concevoir et instrumenter une maquette d'éolienne flottante pour étudier ses chargements internes ;
- Le projet Horizon 2020 FLOATFARM, pour lequel deux campagnes d'essais auront lieu aux bassins de l'ECN (s'intéressant aux efforts internes dans de fortes vagues et aux dispositifs d'ancrage partagés).

## 2 Objectifs de la thèse et méthodes

Il est proposé dans ce sujet de thèse d'étudier la réponse dynamique couplée (houle-structure) d'une éolienne flottante soumise aux vagues et au vent, dans la suite des travaux déjà réalisés sur le sujet au LHEEA [4, 8, 9].

Une première tâche sera le développement d'un modèle numérique basse fidélité utilisant une modélisation simple de la structure couplée avec un modèle hydrodynamique basé sur la formulation de Morison avec un champ de vagues non-linéaire. Le nouvel outil sera validé par comparaison avec des résultats expérimentaux obtenus dans nos bassins sur une éolienne de 10 MW supportée par une spar [8, 9]. Ce nouveau modèle permettra de contribuer au dimensionnement et aux choix d'instrumentation d'une maquette de plateforme d'éolienne de 15 MW (en lien avec le projet CARNOT CIMSUB).

Plusieurs campagnes d'essais seront par la suite conduites durant la thèse, en lien avec d'autres projets expérimentaux au laboratoire, plus particulièrement dans le bassin de génie océanique. Il n'y a à ce jour que très peu de base de données publiques sur les chargements internes d'une plateforme d'éolienne flottante dans la houle. Les mesures faites permettront donc : (1) d'explorer les sensibilités de ces chargements aux différents paramètres régissant les états de mer auxquels est soumis la structure, (2) de valider le modèle basse fidélité développé dans le cadre de cette thèse et (3) de valider des codes de calcul haute fidélité développés au laboratoire. La base de données créée pourra être publiée et ouverte en ligne. Plusieurs cas de chargements pourront être étudiés :

- Chargements en fatigue (Fatigue Limit State, FLS) ;
- Chargements extrêmes (Ultimate Limit State, ULS).

Dans un premier temps, on étudiera la réponse d'une éolienne isolée. En complément de la réponse induite par l'état de mer, l'effet du forçage aérodynamique pourra aussi être inclus, en particulier pour les cas FLS. On cherchera à étudier les effets non-linéaires dans la réponse. Cet élément est important puisque ces effets sont la plupart du temps impossibles à prendre en compte correctement dans les outils de calcul classiques. Une réflexion sera menée sur les similitudes houle et structure et l'extrapolation des phénomènes couplés observés vers l'échelle réelle. Les outils d'analyse développés seront intégrés dans les méthodes d'analyse de mesures du LHEEA.

Dans un second temps, on étudiera les impacts d'un dispositif d'ancrage partagé sur la réponse structurelle de deux éoliennes flottantes. Une campagne d'essai aura lieu sur ce sujet dans le cadre du projet Horizon 2020 FLOATFARM. Il s'agira donc de comparer les résultats obtenus avec l'éolienne seule avec ceux obtenus avec deux éoliennes partageant leur système d'ancrage, en s'appuyant sur les approches numériques (basse fidélité) et expérimentales. On s'intéressera par exemple aux effets d'interaction entre les tensions dans les lignes d'ancrage et les chargements internes dans les structures.

Un déroulé type de la thèse est représenté en Figure 2. Ces activités seront accompagnées de différentes actions de valorisation du travail scientifiques : participation à des conférences internationales, publications dans des journaux internationaux et diffusion des bases de données expérimentales à la communauté.

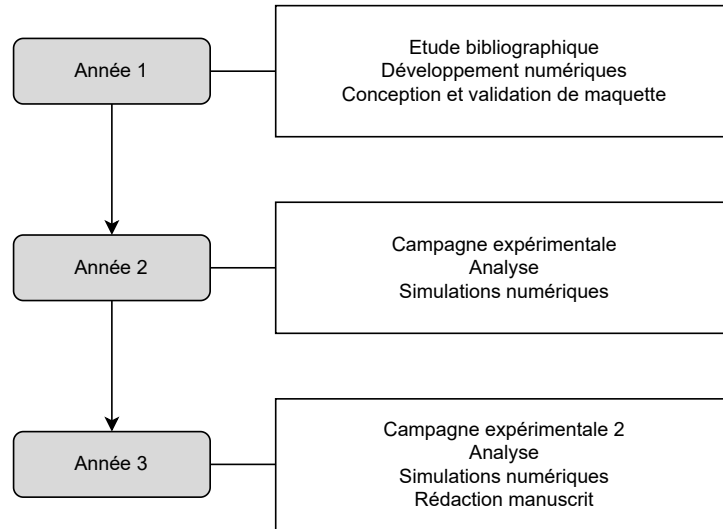


FIGURE 2 – Déroulé de la thèse

### 3 Encadrement

**Lieu de travail :** La thèse s’effectuera à l’Ecole Centrale de Nantes, au sein de l’équipe IIHNE du LHEEA <sup>1</sup>, à l’adresse ci-dessous.

1 Rue de la Noë  
44300 Nantes  
France

**Encadrement :**

- Directeur de thèse : Prof. Guillaume Ducrozet
- Co-encadrant : Dr. Vincent Leroy
- Co-encadrant : Dr. Seung-Yoon Han

**Contact :** Dr. Vincent Leroy

✉ [vincent.leroy@ec-nantes.fr](mailto:vincent.leroy@ec-nantes.fr)  
☎ 02 40 37 16 50

### Références

- [1] B. Skaare, F. G. Nielsen, T. D. Hanson, R. Yttervik, O. Havmøller, and A. Rekdal, “Analysis of measurements and simulations from the hywind demo floating wind turbine,” *Wind Energy*, vol. 18, pp. 1105–1122, apr 2014.
- [2] C. Luan, Z. Gao, and T. Moan, “Comparative analysis of numerically simulated and experimentally measured motions and sectional forces and moments in a floating wind turbine hull structure subjected to combined wind and wave loads,” *Engineering Structures*, vol. 177, pp. 210–233, 2018.
- [3] H. Suzuki, J. Xiong, L. H. S. Do Carmo, D. P. Vieira, P. C. De Mello, E. B. Malta, A. N. Simos, S. Hirabayashi, and R. T. Gonçalves, “Elastic response of a light-weight floating support structure of fowt with guywire supported tower,” *Journal of Marine Science and Technology*, vol. 24, pp. 1015–1028, 2019.

---

1. Page de l’équipe IIHNE : <https://lheea.ec-nantes.fr/navigation/equipes-de-recherche/iihne-interfaces-interactions-en-hydrodynamique-numerique-experimentale>

- [4] V. Leroy, S. Delacroix, A. Merrien, E. E. Bachynski-Polić, and J.-C. Gilloteaux, “Experimental investigation of the hydro-elastic response of a spar-type floating offshore wind turbine,” *Ocean Engineering*, vol. 255, p. 111430, July 2022.
- [5] B. Horel, B. Bouscasse, A. Merrien, and G. Hauteclocque, “Experimental assessment of vertical shear force and bending moment in severe sea conditions,” in *International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering* (A. S. of Mechanical Engineers, ed.), vol. 58783, p. V003T02A031, 2019.
- [6] B. Bouscasse, A. Merrien, B. Horel, and G. De Hauteclocque, “Experimental analysis of wave-induced vertical bending moment in steep regular waves,” *Journal of Fluids and Structures*, vol. 111, p. 103547, 2022.
- [7] V. Arnal, *Modélisation expérimentale d’une éolienne flottante par une approche ”software-in-the-loop”*. PhD thesis, Ecole Centrale de Nantes, 2020.
- [8] X. Ran, V. Leroy, and E. E. Bachynski-Polić, “Hydroelastic response of a flexible spar floating wind turbine : Numerical modelling and validation,” *Ocean Engineering*, vol. 286, p. 115635, Oct. 2023.
- [9] V. Leroy, E. E. Bachynski-Polić, A. Babarit, P. Ferrant, and J.-C. Gilloteaux, “A weak-scatterer potential flow theory-based model for the hydroelastic analysis of offshore wind turbine substructures,” *Ocean Engineering*, vol. 238, p. 109702, 2021.