

MODELISATION HYDRODYNAMIQUE DE STRUCTURES SOLAIRES FLOTTANTES FLEXIBLES

HYDRODYNAMIC MODELLING OF FLEXIBLE FPV STRUCTURES

L. DOUTEAU ⁽¹⁾, F. CASTILLO ⁽¹⁾, S. GUPTA ⁽¹⁾, M. IKHENNICHEU ⁽¹⁾, J.C. GILLOTEAUX ⁽¹⁾

*louis.douteau.com@innosea.fr ; florian.castillo@innosea.fr ; salabh.gupta@innosea.fr ;
maria.ikhennicheu@innosea.fr ; jeanchristophe.gilloteaux@innosea.fr*

⁽¹⁾ Innosea, 11 rue Arthur III, 44000 Nantes

Résumé

Les technologies solaires flottantes sont en rapide expansion. Les développeurs visent maintenant des installations dans des zones plus contraignantes d'un point de vue hydrodynamique, où les structures sont soumises à des contraintes plus importantes, qui entraînent des événements extrêmes, du désalignement et de la fatigue. Ce travail présente une méthodologie de simulation numérique adaptée à ces environnements plus dynamiques. Cette approche consiste en la résolution d'un problème potentiel linéaire avec des degrés de liberté généralisés. Les déformations de la structure flottante sont calculées à l'aide de la méthode d'expansion modale dans le domaine fréquentiel. L'approche est vérifiée à partir d'un cas test académique et une preuve de concept est réalisée, portant sur la simulation d'un îlot solaire flottant composé de barges articulées.

Summary

The floating solar industry is booming. Developers are now looking to install their prototypes in harsher environmental conditions, where hydrodynamic effects have a greater importance on the design of the structures. Extreme events, mismatch and fatigue are expected to play a bigger role. This work presents a numerical methodology suited for simulations under these more complex conditions, through the resolution of a linear potential flow problem and generalized degrees of freedom. This approach is verified on an academical test case, and a proof-of-concept is realized on an articulated technology.

I – Introduction

L'industrie solaire flottante est une industrie jeune, en expansion rapide. Les premiers prototypes datent d'une vingtaine d'années. Les premières installations ont été réalisées dans des environnements très protégés, comme des petits lacs de carrière, où les îlots solaires flottants couvrent la majorité de la surface du lac. Les installations se sont ensuite prolongées vers des lacs de barrage, où le développement de vagues de vent induit plus d'effets hydrodynamiques. Aujourd'hui, des prototypes sont installés en mer, dans des emplacements plus ou moins protégés en fonction des technologies.

Les technologies solaires flottantes peuvent se séparer en 3 grands catégories : les flotteurs individuels, de petite taille, connectés entre eux pour former des îlots ; les mégastructures, où les panneaux photovoltaïques (PV) sont positionnés sur de grandes structures rigides, articulées entre elles ; les structures se basant sur des membranes flexibles. Malgré leurs différences profondes, toutes ces technologies sont sensibles aux effets hydrodynamiques, qui génèrent des mouvements à l'échelle des panneaux PV. Ces mouvements peuvent conduire à des désalignements des panneaux entre eux, ce qui génère des pertes de production. Les rotations génèrent de la fatigue mécanique et des complications électriques, voire des incendies. Tous ces phénomènes restent peu connus, étant donné le faible niveau de maturité de l'industrie et la complexité de modélisation.

Suivant les recommandations du solaire au sol, les études d'installation des premiers parcs solaires flottants se sont concentrées sur les aspects électriques, interaction aérodynamique, ainsi que des études d'ancrage. Dans le cadre d'installations dans des milieux protégés, ces éléments sont suffisants. En revanche, quand l'environnement maritime devient plus complexe (lac de barrage avec vagues de vent, zones côtières plus ou moins protégées), des études dynamiques doivent être conduites. La complexité induite par la modélisation hydrodynamique et l'interaction fluide-structure qui s'en suit est considérable. Si les premières installations n'ont pas fait l'objet de modélisations dynamiques poussées, ces études deviennent nécessaires afin de réduire le conservatisme et les risques liés au dimensionnement des structures et à leur durée de vie. Une approche classique consiste à utiliser des logiciels de simulation hydrodynamique basés sur des éléments finis, comme OrcaFlex. Hérités de l'industrie pétrolière, ces logiciels sont parfaitement adaptés à la simulation de mégastructures rigides. En revanche, la complexité du problème à résoudre dans le cas de flotteurs individuels rend les résolutions très complexes, avec des coûts de calculs pouvant rapidement devenir prohibitifs. Les simulations de membranes flexibles ne rentrent pas dans le cadre théorique couvert par ces logiciels, et si des approches simplifiées existent, le niveau de précision des résultats obtenus reste limité.

Ce document présente une approche de simulation hydrodynamique des structures flexibles basée sur la théorie potentielle linéaire et sur des degrés de liberté généralisés. Les dispositifs solaires flottants sont considérés comme des structures flexibles. Des modes élastiques permettent de représenter les mouvements internes à la structure. Pour la modélisation de structures élastiques, une analyse modale permet de définir les modes de déformation de la structure. Dans le cadre de flotteurs individuels interconnectés, des modes articulés sont définis de manière analytique.

II – Présentation de la méthode

II – 1 Hydrodynamique fréquentielle

L'environnement marin est représenté à l'aide des équations de la théorie potentiel linéaire. Cette approche suppose un fluide non visqueux, incompressible, irrotationnel, de profondeur constante, ainsi que des vagues et mouvements de la structure de faible amplitude. L'équation de conservation de la masse peut être réduite à une équation de Laplace, dont la résolution est possible dans le domaine fréquentiel à l'aide de fonctions de Green. Le potentiel linéaire est découpé en potentiels incident, de diffusion et de radiation. Les différents potentiels sont résolus de manière

indépendante.

La contrainte liée aux vagues de faible amplitude par rapport à la taille des structures peut être limitante pour la simulation de dispositifs solaires flottants, dont le tirant d'eau est faible. De même, les déplacements des structures peuvent rapidement excéder la taille des parties immergées. Une attention particulière doit être portée à la convergence des simulations et à la vérification des résultats obtenus.

Cette étude utilise Capytaine [1] pour la résolution du problème hydrodynamique. Capytaine est un solveur BEM basé sur Nemoh [2], dont il est une réécriture en Python.

L'analyse fréquentielle permet de générer une base de données hydrodynamique, incluant les réponses de la structure simulée selon les différents degrés de liberté considérés pour différentes fréquences de vagues. Des fonctions de transfert peuvent également être établies pour déterminer la réponse impulsionnelle du système.

II – 2 Degrés de liberté généralisés

Les degrés de libertés utilisés classiquement pour la résolution d'un problème potentiel linéaire sont les degrés de libertés rigides en translation et en rotation. L'approche présentée ici repose sur l'utilisation de degrés de libertés généralisés [3], qui sont supportés nativement par Capytaine.

Les degrés de liberté peuvent être définis de plusieurs manières différentes en fonction de l'application physique. La simulation d'une structure élastique peut être effectuée en utilisant des modes de déformations, tandis que des structures articulées peuvent utiliser des modes articulés définis analytiquement [4]. Ces deux approches peuvent être appliquées, respectivement, aux prototypes solaires flottants « membranes » et aux prototypes « articulés », composés de flotteurs individuels interconnectés.

Les modes de déformations sont obtenus via une analyse modale libre, qui se traduit mathématiquement par une résolution de l'équation du mouvement sans amortissement et forces extérieures. Le problème est formulé avec x le vecteur déplacement, M et K les matrices de masse et de raideur.

$$M\ddot{x} + Kx = 0$$

Le vecteur déplacement est décomposé en une combinaison linéaire de modes de déformations φ_i

$$x = \sum_{i=1}^n \varphi_i y_i$$

Le problème modal est résolu par une approche éléments finis, afin d'obtenir les vecteurs φ_i , ainsi que les masses et raideurs modales. Cette résolution est effectuée dans ANSYS 2020 R1.

Les modes articulés sont définis de manière analytique suivant une unique direction. Une structure articulée composée de N barges est décomposée de manière adimensionnelle, afin d'obtenir une distance de 1 entre les points d'articulation. $N - 1$ modes articulés φ_i peuvent ensuite être définis sur la base de fonctions tentes t_i . L'expression utilise x la position adimensionnelle dans la structure articulée et x_i^h la position de l'articulation i [4].

$$t_i(x) = \begin{cases} \frac{1}{|x - x_i^h|}, & |x - x_i^h| \leq 1 \\ 0, & |x - x_i^h| > 1 \end{cases}$$

$$\varphi_i = \begin{cases} t_i + (-1)^i t_{N-i}, & i \neq N - i \\ t_{(N-1)/2}, & N \text{ odd} \end{cases}$$

Les modes φ_i , résolus ou analytiques, sont importés dans Capytaine en tant que degrés de libertés additionnels.

L'ajout de modes élastiques dans le problème potentiel linéaire nécessite de mettre à jour les matrices de masse et de raideur. Dans le cas de modes de déformation, les termes élastiques sont obtenus via les masses et raideurs modales. Dans le cas des modes articulés 1D, les matrices de masse M et de raideur K sont calculées de la manière suivante, avec φ_i et φ_j correspondant maintenant à des degrés de liberté généralisés (rigide ou flexibles).

$$M_{ij} = \int m \varphi_i \varphi_j dx$$

$$C_{ij} = \int EI \frac{d^2 \varphi_i}{dx^2} \frac{d^2 \varphi_j}{dx^2} dx$$

II – 3 Hydrodynamique temporelle

La base de données hydrodynamique peut être utilisée comme base pour résoudre les mouvements de la structure flottante dans le domaine temporel en résolvant l'équation de Cummins [5]. L'équation de Cummins est dérivée de l'équation du mouvement, qui s'exprime dans le cadre hydrodynamique avec M_a et B les masse ajoutée et amortissement de la structure étudiée et F les efforts extérieurs.

$$(M + M_a)\ddot{x} + B\dot{x} + Kx = F$$

Les termes de masse ajoutée et d'amortissement sont tirés de la base de données hydrodynamique. Leur valeur dépend de la fréquence de vague considérée, ce qui rend complexe l'analyse pour des vagues irrégulières. L'équation de Cummins utilise une masse ajoutée à la fréquence infinie $M_a^\infty = M_a(f \rightarrow \infty)$ et un terme « de mémoire » pour représenter le terme d'amortissement. Ce dernier intègre une fonction de réponse impulsionnelle (IRF) R .

$$(M + M_a^\infty)\ddot{x} + \int_{-\infty}^t \dot{x}(\tau)R(t - \tau)d\tau + Kx = F(t)$$

$$R(\tau) = \frac{2}{\pi} \int_0^\infty B(\omega) \cos(\omega\tau) d\omega$$

La complexité de l'équation de Cummins réside dans le terme intégral, qui nécessite d'utiliser l'historique des vitesses à chaque intégration. Plusieurs solutions permettent d'optimiser la résolution [6] ; cette étude préfère une résolution directe, plus précise, effectuée à l'aide d'un schéma Runge-Kutta 4.

III – Résultats

III – 1 Vérification sur un cas académique

L'implémentation de la méthodologie présentée en Sec. II est vérifiée sur le cas académique d'une barge rectangulaire [3]. Ce cas test a été sélectionné en raison des similarités existantes avec des structures solaires flottantes. Une barge de 80m de long, 10m de large, 10m de haut est modélisée, avec un tirant d'eau de 5m. Les deux premiers modes de déformation de cette barge sont extraits à partir d'une analyse par éléments finis effectuée dans ANSYS 2020 R1. Les modes de déformation sont intégrés en tant que degrés de liberté dans une modélisation hydrodynamique fréquentielle Capytaine. Un maillage de 2304 panneaux (64 x 16 x 8) est utilisé conformément à [3], avec raffinement en cosinus pour concentrer les mailles au niveau des arêtes de la barge.

La vérification est effectuée à partir de la réponse impulsionnelle (RAO) de l'élévation de la proue de la barge. Une comparaison est faite avec les résultats de [3], sur 2 degrés de liberté rigides et les 2 premiers degrés de liberté flexibles. Une comparaison satisfaisante est obtenue, avec seulement des différences mineures au niveau des amplitudes. Des pseudo RAO ont ensuite été définies à partir des RAO obtenues, afin de valider la résolution temporelle. Les résultats montrent le bon comportement de la résolution temporelle.

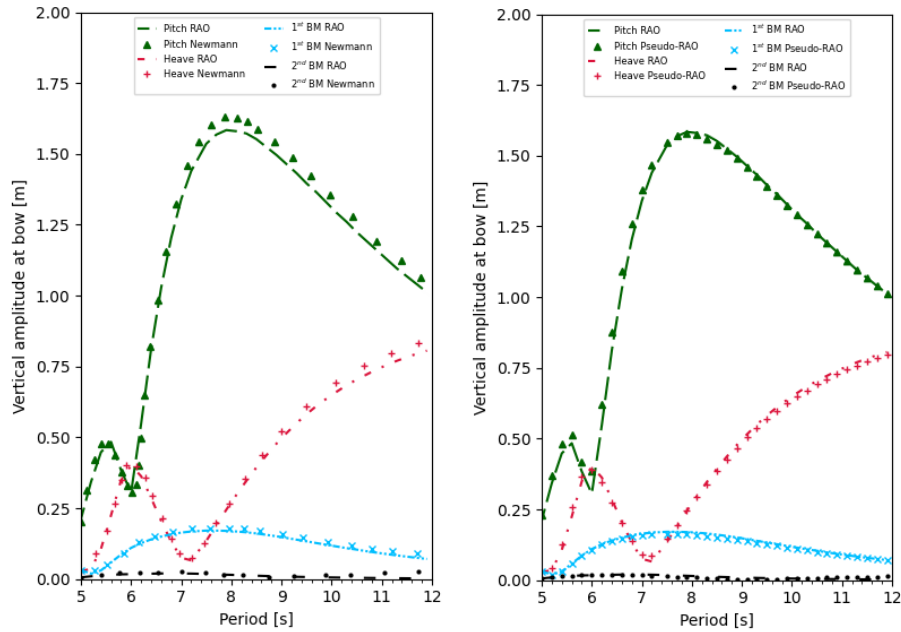


Figure 1. Gauche : Comparaison des fonctions de transfert (RAO) de la barge entre [3] (légende Newman) et cette étude (légende RAO). Droite : Comparaison entre les RAO de cette étude et les pseudo-RAO, reconstruites à partir de données temporelles.

III – 2 Vérification et validation sur des essais bassin d’un tore flexible

Une validation préliminaire a été effectuée sur un tore flexible [7]. Cette structure est étudiée en tant que composante structurelle d’une structure solaire flottante, dans le cadre d’essais en bassin. Le tore a un diamètre de 1.5m. Un cylindre de 26mm de diamètre et 6mm d’épaisseur forme le ruban extérieur du tore. Le matériau utilisé a une densité de $2.22 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$ et un module d’Young de $8.17 \cdot 10^8 \text{ N/m}^2$. La modélisation ANSYS du tore est montrée en Fig. 2. Après une analyse de convergence, un maillage hydrodynamique de 1260 panneaux est utilisé.

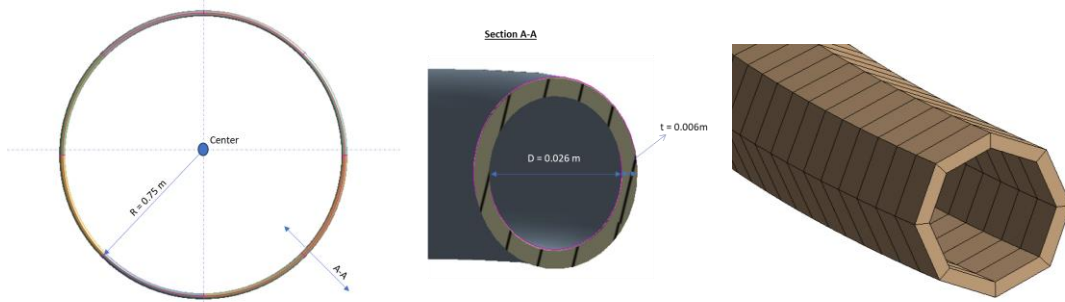


Figure 2. Détails du tore rigide [7]. Droite : Vue du maillage du tore dans ANSYS 2020 R1.

Dans un premier temps, une étude hydrodynamique est effectuée en considérant le tore rigide. Le tore est modélisé, l’hydrodynamique est résolue dans le domaine fréquentiel, puis dans le domaine temporel. Cette approche est suivie avec la suite OrcaWave/OrcaFlex et avec les outils présentés dans cette étude. La comparaison porte sur le comportement du tore en pilonnement, dont les résultats sont présentés en Fig. 3. Les pseudo-RAO obtenues dans le domaine temporel sont comparées aux RAO de WAMIT et d’OrcaWave, ainsi qu’à des pseudo-RAO obtenues avec OrcaFlex. Les résultats montrent une comparaison satisfaisante avec les logiciels de référence

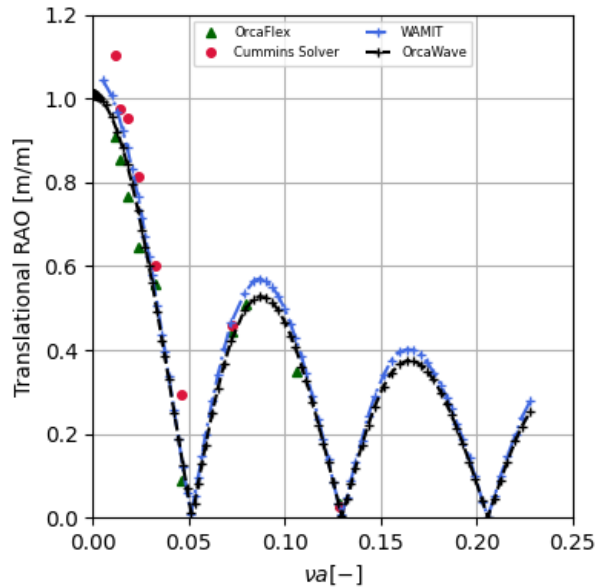


Figure 3. Comparaison des RAO obtenues avec Wamit [7] et OrcaWave, et des pseudo-RAO obtenues avec OrcaFlex et cette étude (légende Cummins solver).

Une étape de validation a ensuite porté sur le cas du tore flexible. Les modes de déformation du tore sont extraits à partir du modèle présenté en Fig. 2 ; un exemple est présenté en Fig. 4. Une résolution hydrodynamique utilisant un seul mode de déformation en tant que degré de liberté est effectuée. La résolution est faite dans les domaines fréquentiels puis temporels, pour un champ de vagues d'Airy unidirectionnel. L'accélération verticale en différentes positions du tore est extraite et comparée en valeur adimensionnelle avec des données expérimentales [7]. Les positions considérées forment un angle avec le champ de vagues incident de 0° (front), 45° (front-left), 90° (left), 135° (aft-left) et 180° (aft).

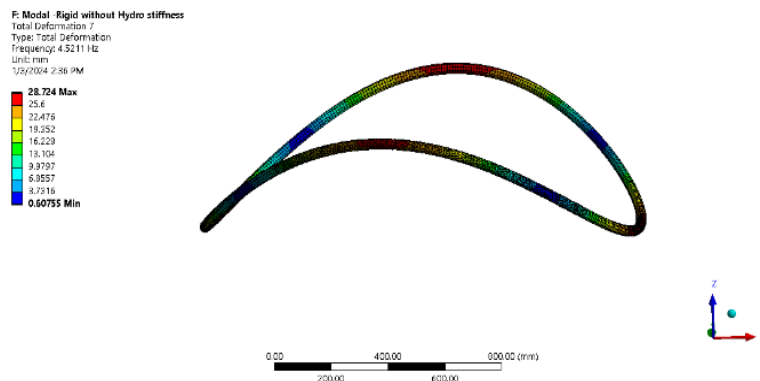


Figure 4. Premier mode de déformation du tore, considéré dans l'analyse hydrodynamique.

Les résultats de validation sont présentés en Fig. 5. Les résultats montrent un bon accord pour les vagues ayant un nombre d'onde faibles, c'est-à-dire pour les vagues les plus longues. Quand le nombre d'onde augmente, les points 0° et 180° , respectivement nommés « front » et « aft », montrent un comportement satisfaisant, même si un phénomène oscillatoire apparaît. Les résultats pour les cas 45° , 90° et 135° montrent des écarts nettement plus importants. Les écarts identifiés ici peuvent s'expliquer par différents phénomènes. La géométrie modélisée est très contraignante pour l'approche potentiel linéaire, avec un diamètre de tore très grand vis-à-vis du diamètre de section. L'utilisation d'un unique mode de déformation est limitant pour la résolution des déformations de la structure.

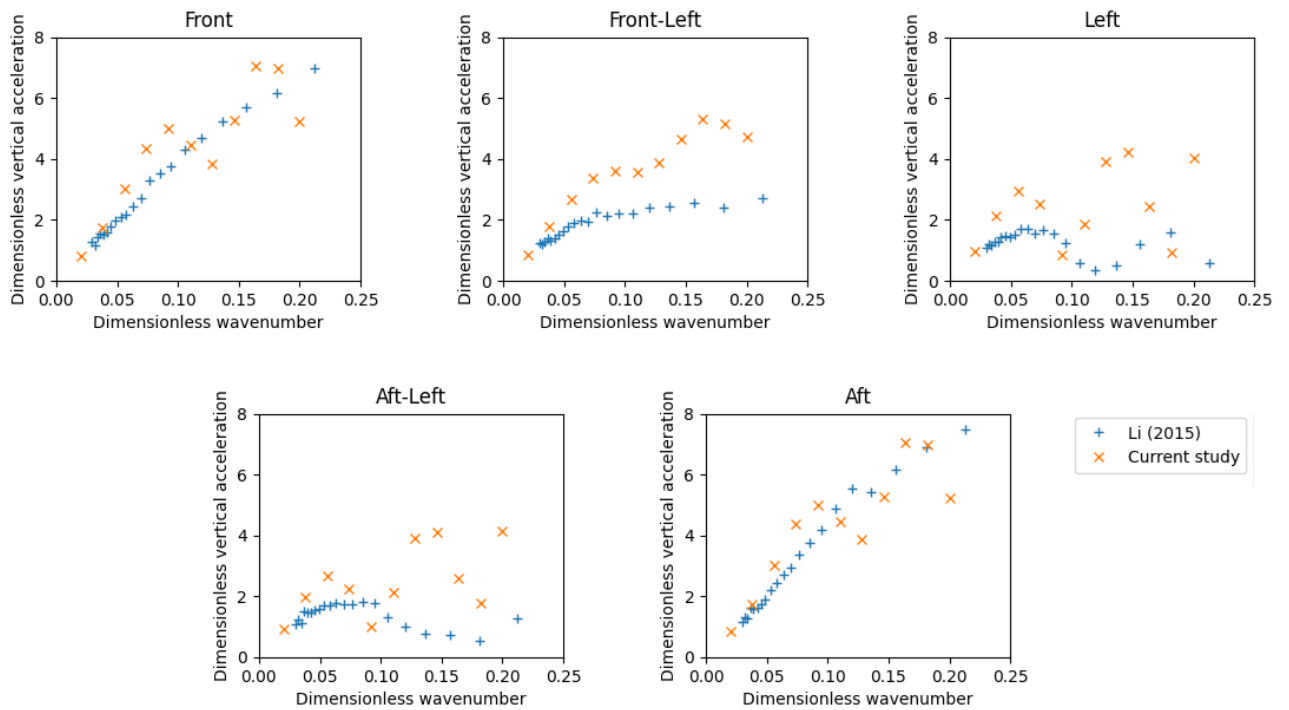


Figure 4. Accélérations verticales en différents points du tore. Comparaison aux résultats de [7]. Les grandeurs adimensionnelles sont définies dans [7].

III – 3 Validation préliminaire sur des essais bassin d’un îlot de flotteurs articulés

Une validation est également menée sur les solutions articulées. Le cas d’essais en bassin d’un îlot solaire flottant composé de flotteurs individuels articulés [8] est considéré. Un ensemble de 16 flotteurs développés par Heliorec sont disposés dans un arrangement 4×4 , avec des allées de maintenance tous les 2 flotteurs. La Fig. 5 montre un schéma du dispositif. Une représentation simplifiée est effectuée, où toutes les structures flottantes sont considérées comme des parallélépipèdes avec une masse répartie uniformément. Les modules FPV, i.e., les ensembles flotteur+panneau, sont modélisés sur la base de la géométrie du flotteur, avec une prise en compte du panneau via sa masse uniquement. Une série d’allées et de modules est considérée, afin d’obtenir le dispositif 4×1 représenté en Fig. 5. Ce modèle simplifié représente uniquement une partie des structures, de manière approchée, et sans considérer la raideur due à l’ancrage. Il est utilisé pour fournir une preuve de concept et valider les ordres de grandeur de déplacement des structures. Un ensemble de modes articulés définis suivant la procédure détaillée en Sec. II-2 est utilisé. Après une analyse de convergence de maillage, le maillage présenté en Fig. 5 est utilisé pour la modélisation.

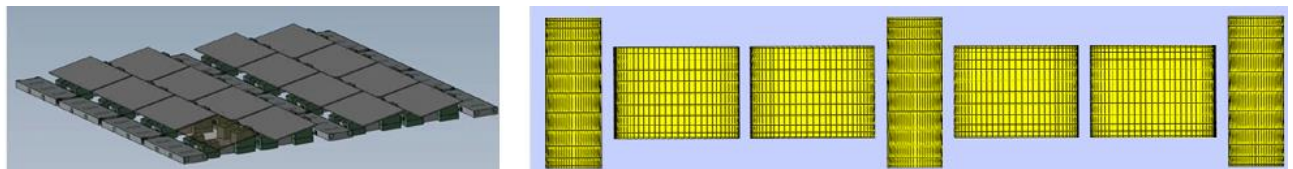


Figure 5. Gauche : Îlot solaire flottant Heliorec, avec 4×4 panneaux et 3 allées de maintenance [3]. Droite : Maillage de la représentation simplifiée 4×1 .

Le comportement fréquentiel du modèle 4×1 est comparé aux résultats expérimentaux pour le cas de vagues alignées avec l’axe principal de la structure articulée. Les résultats expérimentaux sont tirés des mouvements des flotteurs de la deuxième rangée, numérotés respectivement 2, 6, 10 et 14. Un champ de vague d’Airy aligné avec la rangée est considéré, qui impacte d’abord le flotteur 2, puis dans l’ordre les 6, 10 et 14. Les résultats sont présentés en Fig. 6. Un découpage arbitraire du

domaine fréquentiel considéré met en exergue les différences de comportement du flotteur. Pour des vagues longues ($T > 2s$), les RAOs montre un comportement de bouchonnage, où la structure suit les vagues. Cette configuration est la plus simple à modéliser et donne les meilleurs résultats. Dans le cas de vagues courtes ($T < 2s$), le comportement des flotteurs devient très différent des résultats expérimentaux. La résonance trouvée en bassin n'est pas reproduite. Les déplacements relatifs des flotteurs, i.e., les uns par rapport aux autres, ne sont pas non plus correctement simulés. En revanche, cette approche préliminaire montre bien l'atténuation des mouvements des flotteurs, où le premier impacté, i.e., le flotteur 2, atténue les vagues perçues par les suivants.

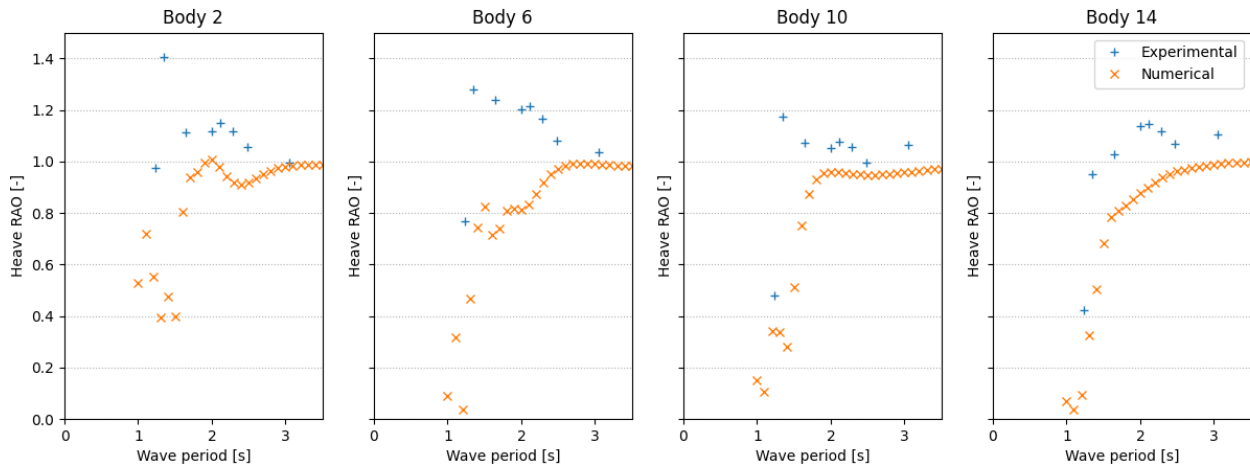


Figure 6. Fonctions de transfert en pilonnement pour les différents flotteurs. Chaque figure compare données numériques et expérimentales [8] pour un flotteur donné.

IV – Conclusions et perspectives

Cette étude a détaillé une approche hydro-élastique pour la modélisation de structures solaires flottantes. Une résolution hydrodynamique du problème potentiel linéaire avec une approche BEM utilisant des degrés de liberté généralisés est présentée. Deux stratégies de définition des degrés de liberté généralisés sont introduites, permettant la modélisation de différents types de structures. Les étapes de vérification et validation de l'approche ont été détaillées. La capacité à simuler des structures flexibles ou articulées est confirmée, dans un cadre préliminaire. Des résultats pertinents en termes d'ordre de grandeur sont obtenus, même si toutes les tendances ne sont pas résolues. Le potentiel de l'approche, notamment pour la réduction du temps de calcul pour le cas de multiples structures articulées, n'a pas été exploré en détail mais reste prometteur.

Plusieurs limitations sont actuellement présentes dans la modélisation. Le simulateur actuel ne prend pas en compte les ancrages, que ce soit par la raideur induite dans la résolution fréquentielle ou par l'impact des forces dans la résolution temporelle. La définition des degrés de liberté généralisés reste relativement peu mature, notamment pour les structures articulées. L'approche considérée actuellement permet la simulation de structures 1D, i.e., de dispositions $N \times 1$. Une approche permettant la résolution d'îlots complets reste à développer. La caractérisation des connections des flotteurs et la prise en compte de la raideur des connections pourra être un développement ultérieur. Pour l'utilisation de modes de déformation, la définition de modes mouillés a été investiguée, mais aucune implémentation n'a été faite pour le moment.

Les prochains développements devraient se concentrer sur la modélisation des structures articulées. Dans un premier temps une validation complète sera effectuée. La performance de l'approche sera comparée aux logiciels commerciaux type OrcaFlex, afin de comparer les résultats obtenus et de déterminer le potentiel de chaque outil. Une conclusion attendue est le type de

modélisation à effectuer en fonction des grandeurs attendues en sortie et de la taille des structures flottantes.

Remerciements

Le projet a reçu un financement dans le cadre du projet BOOST, du programme de recherche et d'innovation Horizon 2020 de l'Union Européenne, sous la convention de subvention n°965671. Le projet a également été financé dans le cadre du projet TRUST PV, du programme de recherche et d'innovation Horizon 2020 de l'Union Européenne, sous la convention de subvention n°952957. Les auteurs remercient le groupe ABL pour son soutien dans le cadre du projet FPV Reach.

Les auteurs remercient Heliorec pour l'accès aux données d'essai en bassin. Les auteurs remercient Simon Tonnel et Anoop Kumulom-Kuzhiyil pour leurs contributions à la modélisation des structures articulées.

Références

- [1] Ancellin and Dias (2019), *Capytaine: a Python-based linear potential flow solver*, Journal of Open Source Software, 4(36), 1341, <https://doi.org/10.21105/joss.01341>
- [2] Babarit and Delhommeau (2015), *Theoretical and numerical aspects of the open source BEM solver NEMOH*, Proceedings of the 11th European Wave and Tidal Energy Conference (EWTEC2015),
- [3] Newman, J. N. (1994). *Wave effects on deformable bodies*. Applied ocean research, 16(1), 47-59.
- [4] Newman, J. N. (1997). *Wave effects on hinged bodies. Part I—body motions*.
- [5] Cummins, *The impulse response function and ship motions*, 1962
- [6] Armesto et al. *Comparative analysis of the methods to compute the radiation term in Cummins' equation*, 2015
- [7] Li. *A Theoretical and Experimental Study of Wave-induced Hydroelastic Response of a Circular Floating Collar*, 2017
- [8] Delacroix et al. *Experimental modelling of a floating solar power plant array under wave forcing*. Energies, 2023, vol. 16, no 13, p. 5198.