

# Simulation numérique des opérations marines à partir d'un modèle d'écoulement potentiel basé sur l'hypothèse « weak-scatterer »

P.-Y. Guillaume<sup>a,b</sup>, A. Babarit<sup>a</sup>, M. Lynch<sup>b</sup>, P. Ferrant<sup>a</sup>

a. Ecole Centrale de Nantes, LHEEA – pierre-yves.wuillaume@ec-nantes.fr

b. INNOSEA

## Résumé :

*L'éolien offshore est l'énergie marine la plus avancée et utilisée dans le monde. Afin d'accroître l'énergie extraite du vent, les dimensions des éoliennes deviennent plus importantes et les parcs éoliens sont installés de plus en plus loin des côtes, où les mers sont agitées et les vents forts. De fait, les opérations marines sont plus complexes et plus chères et les fenêtres météo sont écourtées et se raréfient.*

*Dans le cadre de ce papier, un logiciel de simulation numérique des opérations marines est développé, en particulier pour des applications de descentes et de remontées de colis lourds. L'Algorithme aux Corps Rigides composites, implémenté dans le logiciel InWave, est utilisé pour modéliser le système multicorps. Un modèle de câble et de treuil est développé, avec la théorie multicorps utilisée, et comparé à la théorie câble classique dite « lumped mass ». Les efforts hydrodynamiques ainsi que les interactions hydrodynamiques sont modélisés par une théorie d'écoulement potentiel instationnaire basée sur l'hypothèse de faible perturbation, dite « weak-scatterer ». L'approche « weak-scatterer », implémenté dans le logiciel WS\_CN, est étendue aux simulations multi-flotteurs et validée par comparaison avec des données expérimentales.*

*InWave et WS\_CN sont couplés afin de résoudre l'interaction houle-structure pour des systèmes multicorps articulés en mer. Un couplage fort est adopté pour sa robustesse. L'équation de couplage est établie et validée via des comparaisons avec WS\_CN. Le logiciel ainsi créé se nomme InWaveS\_CN et utilise une code d'intégration en Python.*

*Enfin, des essais en bassin d'une opération de redressement ont été menés à l'Ecole Centrale de Nantes. La comparaison entre les simulations numériques et les données expérimentales offre une première et prometteuse validation d'InWaveS\_CN.*

## Abstract:

*Offshore wind represents the most advanced and used marine energy in the world. To increase the wind power extraction, turbines grow in size and wind farms are installed further offshore in presence of rough seas and strong winds. Marine operations become more challenging and expensive, weather windows are shorter and less frequent.*

*This paper focuses on the development of a numerical tool to simulate marine operations with consistency, in particular lowering and lifting operations. The Composite-Rigid-Body Algorithm, implemented in the numerical tool InWave, is used to model multibody systems. A cable model and a*

*winch model are developed with this multibody approach and compared to the classical low-order lumped mass theory. Hydrodynamic loads and hydrodynamic interactions are simulated using an unsteady potential flow theory based on the weak-scatterer hypothesis, implemented in the numerical tool WS\_CN. This approach is extended to multibody simulations and validated with comparisons to experimental data.*

*InWave and WS\_CN are coupled to solve wave-structure interaction for articulated multibody systems with large relative motions in waves. A tight coupling is selected for its robustness. The coupling equation is derived and validated from comparisons with WS\_CN. This leads to the creation of a new numerical tool, InWaveS\_CN, using Python as glue code language.*

*Experiments of an upending operation were conducted at Ecole Centrale de Nantes. The comparison between the numerical simulations and the experimental data leads to a first and promising validation of InWaveS\_CN.*

**Mots clefs : Opérations marines, Dynamique multicorps, Dynamique de câbles, Ecoulement potentiel, Weak-scatterer, Interaction fluide-structure.**

## 1 Introduction

Avec l'augmentation des dimensions des éoliennes ainsi que leur implantation dans des zones où les mers sont plus agitées et les vents plus forts, les opérations marines deviennent de plus en plus complexes. Le coût de ces opérations représente 30 % du prix final de l'électricité et influe donc significativement sur la compétitivité des énergies marines par rapport aux énergies conventionnelles (charbon, pétrole, gaz, etc.) [1]. D'où la nécessité d'étudier les opérations marines, aussi bien théoriquement qu'expérimentalement ou numériquement, pour en diminuer les risques et les coûts et ainsi favoriser le développement des énergies marines renouvelables.

Il existe différents types d'opérations marines, tels que les opérations de remorquage, de redressement, de déchargement, de dépose de câbles, d'enfoncement de monopieux, etc. Ce papier porte principalement sur un autre type d'opération : les opérations de descente ou de remontée de colis lourds en mer. Ces dernières sont constituées d'un navire, d'une grue installée sur le navire, d'un câble de levage, d'un treuil, d'élingues ou de grèements et d'un colis à déposer ou remonter (cf. Figure 1). Au cours de ces opérations, différents risques sont présents : l'imprécision de la position du colis, la collision entre le colis et le navire, des efforts brusques dans les câbles, etc. C'est pourquoi il est nécessaire de modéliser et simuler ce type d'opération pour en prévenir les risques.

La simulation numérique des opérations de descente et de remontée de colis a été intensément étudiée dans la littérature. Ces travaux peuvent être classés en trois catégories : les analyses mécaniques, hydrodynamiques, et de contrôle des mouvements.

Une opération de descente nécessite de simuler un système multicorps articulé. Le navire, les câbles et le colis sont en interaction mécanique. Les premiers modèles mécaniques étaient basés sur des approches simplifiées : découplage de la dynamique du colis de celle du navire [2], linéarisation des équations du mouvement [3] ou problème bidimensionnel [4]. Ensuite, des modèles tridimensionnels, non-linéaires et résolvant l'interaction mécanique entre les corps apparurent [5, 6, 7]. Ces études avaient pour point en commun de maintenir le colis en l'air, de sorte que seul le navire subissait des efforts hydrodynamiques. Afin d'écrire et de résoudre automatiquement les équations de mouvement, des algorithmes de mécanique multicorps furent utilisés, basés sur les équations de Newton-Euler [8] ou de Euler-Lagrange [9].

Concernant le modèle hydrodynamique d'une opération de descente de colis, la plupart des travaux utilisèrent la théorie des écoulements potentiels linéarisés dans le domaine fréquentiel [10,11,12,13]. Cette théorie suppose que les corps ont un mouvement de faible amplitude et que la houle a une faible cambrure. Ces hypothèses sont valides dans le cas où le colis est en l'air et en mer calme mais quand le colis est dans l'eau en étant descendu ou remonté alors ces hypothèses sont violées (grand mouvement relatif entre les corps). C'est pourquoi Hannan [14] utilisa une théorie des écoulements potentiels non-linéaires dans sa thèse de doctorat car les hypothèses de la théorie linéaire n'ont pas à être satisfaites. Néanmoins le modèle mécanique était constitué d'une barge fixe et d'un câble rigide. Les logiciels commerciaux de simulation numérique offshore (*OrcaFlex* [15], *DeepLines* [16], *SIMO* [17], etc.) sont capables de modéliser les interactions mécaniques mais sont tous basés sur une approche d'écoulement potentiel linéarisé. C'est pourquoi il est nécessaire de développer un outil numérique prenant en compte les interactions mécaniques et étant cohérent d'un point de vue hydrodynamique pour simuler une opération de descente ou de remontée de colis. Guillaume et al. [18] utilisèrent un modèle d'écoulement potentiel basé sur l'approximation de faible perturbation dite « *weak-scatterer* », implémenté dans le code *WS\_CN*. Ce modèle a été couplé à un solveur de mécanique multicorps nommé *InWave* dans le cas où un seul corps est soumis à des efforts hydrodynamiques et se trouvant en racine du système multicorps. Le but de ce papier est de présenter les avancées obtenues avec le couplage entre *InWave* et *WS\_CN*, nommé *InWaveS\_CN*, et de comparer les résultats numériques d'*InWaveS\_CN* avec des données expérimentales issues d'essais en bassin à l'*Ecole Centrale de Nantes* dans le cas d'une opération de redressement d'un flotteur d'éolienne de type spar.



**Figure 1** : Opération de remontée de l'hydrolienne Sabella D10<sup>1</sup>

<sup>1</sup> <http://www.sabella-d10.bzh>

## 2 Théorie multicorps

La théorie de mécanique multicorps utilisée permet de simuler des systèmes multicorps articulés de type arbre cinématique (cf. Figure 2), c'est-à-dire qu'ils ne disposent pas de boucles cinématiques. Concrètement, chaque corps du système multicorps ne possède qu'un unique prédécesseur mais potentiellement plusieurs successeurs. Dans le cas où plusieurs successeurs seraient présents, des boucles cinématiques apparaîtraient. Les corps sont considérés comme rigides et séparés les uns des autres par une articulation autorisant un seul degré de liberté soit en translation (liaison glissière) soit en rotation (liaison pivot). Chaque corps est repéré via des coordonnées relatives par rapport à son (unique) prédécesseur en utilisant les paramètres modifiés de Denavit-Hartenberg. Le corps racine (ou la base) du système multicorps est repéré avec des coordonnées Cartésiennes. Cette modélisation permet d'écrire les équations cinématiques récursives du système multicorps.

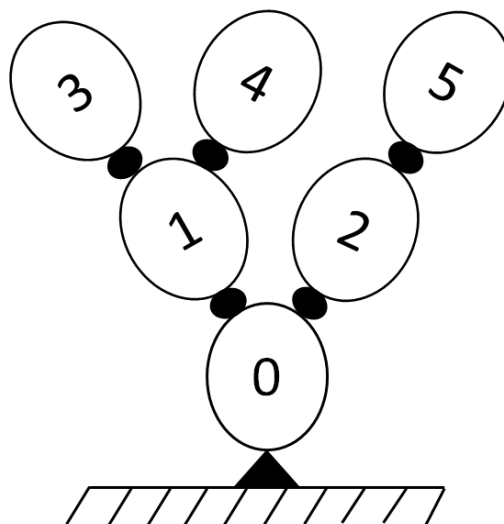
L'algorithme dynamique utilisé se nomme l'Algorithme aux Corps Rigides Composites (ACRC) et permet la résolution d'un problème de dynamique multicorps directe, c'est-à-dire où les efforts extérieurs et intérieurs sont connus et l'accélération des corps inconnues. L'équation du mouvement du système multicorps, dérivée des équations de Newton-Euler, est :

$$\mathbf{H}(\mathbf{q}) \begin{pmatrix} {}^0\dot{\mathbf{V}}_0 \\ \ddot{\mathbf{q}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{0}_{6 \times 1} \\ \mathbf{\Gamma} \end{pmatrix} - \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \quad (1)$$

avec :

- $\mathbf{H}$  la matrice masse généralisée du système multicorps ;
- $\mathbf{C}$  le vecteur des efforts extérieurs et des accélérations d'entraînement et de Coriolis ;
- $\mathbf{\Gamma}$  le vecteur des efforts internes projetés selon l'axe des liaisons ;
- ${}^0\dot{\mathbf{V}}_0$  l'accélération de la base par rapport au repère inertiel et exprimée dans le repère de la base ;
- $\mathbf{q}$  le vecteur des positions articulaires.

L'ACRC permet de calculer la matrice  $\mathbf{H}$  et le vecteur  $\mathbf{C}$  à partir des équations cinématique récursives. Connaissant  $\mathbf{\Gamma}$ , les accélérations peuvent être calculées. L'ACRC est implémenté dans le logiciel *InWave* [19] développé par *INNOSEA* et l'*Ecole Centrale de Nantes*. L'intégration en temps se fait grâce à un schéma de type Runge-Kutta d'ordre 4.



**Figure 2** : Schéma d'un arbre cinématique. Cercle noir : corps, point noir : articulation.

### 3 Modèle de câble

Les câbles sont simulés via un modèle dynamique basé sur la discrétisation des câbles en éléments et en nœuds, où la masse de l'élément est concentrée. Afin de modéliser l'élasticité du câble et les frottements internes, chaque élément comprend un ressort et un amortisseur. Lorsque cette approche utilise des coordonnées Cartésiennes pour repérer les nœuds, elle est appelée la méthode « *lumped mass* » et est communément utilisée pour simuler les systèmes d'ancrage [20,21]. L'Algorithme aux Corps Rigides Composites est utilisé pour simuler des câbles suivant cette même approche. Chaque élément câble est modélisé par trois articulations : deux liaisons pivots et une liaison glissière. Les efforts internes à la liaison glissière permettent de modéliser l'élasticité et les frottements. Ils s'expriment comme suit :

$$F_j = \begin{cases} -\frac{EA}{L_u}(q_j + L_u) - \frac{CA}{L_u}\dot{q}_j & \text{si } |q_j| \geq L_u; \\ -\frac{CA}{L_u}\dot{q}_j & \text{sinon.} \end{cases} \quad (2)$$

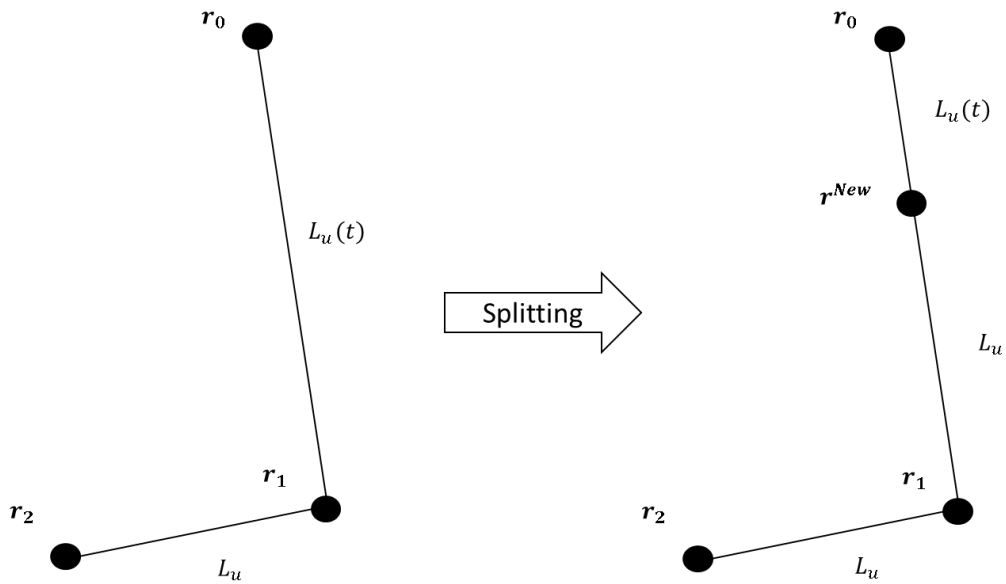
où E, C, A et  $L_u$  représentent respectivement le module d'Young, le coefficient d'amortissement, l'aire de la section du câble et la longueur à vide de l'élément câble. L'indice j indique le numéro du corps dans le système multicorps. Il n'y a pas d'efforts internes dans les liaisons pivots, la flexion et la torsion du câble ne sont donc pas modélisées.

La méthode « *lumped mass* » et la modélisation utilisant l'ACRC ont été comparées par Guillaume et al. [18] et prouvent, par leur accord, que les approches sont identiques.

Afin de pouvoir descendre ou remonter un colis, il est nécessaire d'avoir un modèle de treuil. Ce modèle se base sur l'ajout ou la suppression d'éléments câble pendant la simulation temporelle. L'élément câble connecté au treuil voit sa longueur à vide être modifiée. Les efforts internes dans la liaison glissière de cet élément sont exprimés par :

$$F_j = \begin{cases} -\frac{EA}{L_u}(q_j + L_u) - \frac{CA}{L_u}(\dot{q}_j + v_d(t)) & \text{si } |q_j| \geq L_u; \\ -\frac{CA}{L_u}(\dot{q}_j + v_d(t)) & \text{sinon.} \end{cases} \quad (3)$$

Avec  $v_d$  la vitesse de déroulement, positive pour la descente de colis, négative pour une remontée. La figure 3 présente un schéma où un élément câble et un nœud sont ajoutés lorsque le câble est déroulé. Les méthodes « *lumped mass* » et multicorps (ACRC) donnent également les mêmes résultats dans le cas d'un modèle de treuil [22].



**Figure 3** : Ajout d'un élément câble lors du déroulement d'un câble. Les vecteurs  $\mathbf{r}$  représentent les positions des nœuds. Le treuille se trouve au niveau du nœud 0.

## 4 Théorie hydrodynamique

Le modèle hydrodynamique repose sur la théorie d'écoulement potentiel faiblement non-linéaire basée sur l'approximation de faible perturbation, dite « *weak-scatterer* ». Les principales équations régissant cette théorie sont décrites ci-dessous, d'avantages de détails peuvent être trouvés dans [22,23]. Le fluide est supposé incompressible et non visqueux tandis que l'écoulement est considéré comme irrotationnel. En conséquence, le champ de vitesse du fluide dérive d'un potentiel de vitesse  $\phi$  :

$$\mathbf{V} = \nabla\phi \quad (4)$$

Le potentiel de vitesse, respectivement l'élévation de surface, est décomposé en une composante incidente connue  $\phi^I$ , respectivement  $\eta^I$ , et une composante perturbée inconnue  $\phi^P$ , respectivement  $\eta^P$  :

$$\begin{cases} \phi = \phi^I + \phi^P \\ \eta = \eta^I + \eta^P \end{cases} \quad (5)$$

Le champ de vitesse incidente est calculé à partir d'un modèle de houle d'Airy :

$$\phi^I = \frac{Ag}{\omega} \frac{\cosh(k(z+h))}{\cosh(kh)} \sin(kx - \omega t) \quad (6)$$

avec  $A$ ,  $g$ ,  $\omega$  et  $k$  l'amplitude de la houle, l'accélération de la pesanteur, la pulsation de la houle et le nombre d'onde.

Les composantes incidentes et perturbées vérifient l'hypothèse de faible perturbation :

$$\begin{cases} \phi^P \ll \phi^I \\ \eta^P \ll \eta^I \end{cases} \quad (7)$$

Le potentiel perturbé du champ de vitesse est solution d'une équation de Laplace dans le domaine fluide :

$$\Delta\phi^P = 0 \quad (8)$$

La méthode aux éléments frontières est utilisée pour résoudre cette équation. Grâce à la deuxième identité de Green, on obtient l'équation intégrale en chaque point de la surface du domaine fluide :

$$\phi^P(M)\Omega(M) + \iint_S \phi_n^P(P)G(M,P)dS - \iint_S G_n(M,P)\phi^P(P)dS = 0 \quad (9)$$

où  $G$  est la fonction de Green de type Rankine :

$$G(M,P) = \frac{1}{|MP|} \quad (10)$$

Les conditions limites cinématique et dynamique de surface libre sont linéarisées au niveau de la surface libre incidente  $z = \eta^I$  :

$$\frac{D_0\phi^P}{Dt} = -\dot{\phi}^I - g(\eta^I + \eta^P) - \frac{1}{2}\nabla\phi^I \cdot \nabla\phi^I - (\nabla\phi^I - \mathbf{v}_{mesh}) \cdot \nabla\phi^P - \eta^P \left( \frac{\partial\dot{\phi}^I}{\partial z} + \frac{\partial(\nabla\phi^I \cdot \nabla\phi^I)}{\partial z} \right) - \nu\phi^P \quad (11)$$

$$\frac{D_0\eta^P}{Dt} = -\dot{\eta}^I + \frac{\partial(\phi^I + \phi^P)}{\partial z} - \nabla\phi^I \cdot \nabla\eta^I - \nabla\phi^P \cdot \nabla\eta^I - (\nabla\phi^I - \mathbf{v}_{mesh}) \cdot \nabla\eta^P + \eta^P \left( \frac{\partial^2\phi^I}{\partial z^2} - \frac{\partial(\nabla\phi^I \cdot \nabla\eta^I)}{\partial z} \right) - \nu\eta^P \quad (12)$$

avec  $\nu$  le coefficient d'amortissement de la plage absorbante numérique et  $\mathbf{v}_{mesh}$  la vitesse des nœuds du maillage de surface libre.

La condition de glissement sur la surface du corps  $j$  est :

$$\phi_n^P = -\phi_n^I + [\mathbf{v}_j + \boldsymbol{\omega}_j \times (\mathbf{x} - \mathbf{x}_j)] \cdot \mathbf{n} \quad (13)$$

avec  $\mathbf{v}_j$ ,  $\boldsymbol{\omega}_j$ ,  $\mathbf{x}_j$   $\mathbf{x}$  and  $\mathbf{n}$  la vitesse du corps au centre de gravité, la vitesse angulaire, la position du centre de gravité, la position du nœud du maillage du corps et la normal en ce point.

La pression est obtenue via l'équation de Bernoulli :

$$p = -\rho \left[ \dot{\phi}^I + \dot{\phi}^P + \frac{1}{2}(\nabla\phi^I \cdot \nabla\phi^I + 2\nabla\phi^I \cdot \nabla\phi^P) + gz \right] \quad (14)$$

Les efforts hydrodynamiques exercés sur le corps  $j$  sont calculés par l'intégration de la pression sur la surface mouillée  $S_{B_j}$  du corps :

$$\mathbf{F}_j = \begin{pmatrix} \iint_{S_{B_j}} p \mathbf{n} dS \\ \iint_{S_{B_j}} p [(\mathbf{x} - \mathbf{x}_j) \times \mathbf{n}] dS \end{pmatrix} \quad (15)$$

Ces efforts font intervenir la dérivée temporelle du potentiel perturbée de vitesse  $\dot{\phi}^P$  qui est inconnue. Pour la calculer, un deuxième problème aux éléments frontières est formé sur  $\dot{\phi}^P$ . L'équation 9 devient :

$$\dot{\phi}^P(M)\Omega(M) + \iint_S \dot{\phi}_n^P(P)G(M,P)dS - \iint_S G_n(M,P)\dot{\phi}^P(P)dS = 0 \quad (16)$$

La condition de glissement du corps  $j$  portant sur la dérivée temporelle du potentiel de vitesse est donnée par Letournel et al. [24] :

$$\dot{\phi}_n^P = -\dot{\phi}_n^I + \mathbf{CK}_j \dot{\boldsymbol{\eta}}_j + q_j \quad (17)$$

où  $\dot{\boldsymbol{\eta}}_j$  est l'accélération du corps et  $q_j$  est un terme provenant de la dérivation temporelle. Les expressions de  $\mathbf{CK}_j$  et  $q_j$  sont donnés dans [24].

Afin de fermer le système d'équations différentielles, les équations 16 et 17 sont couplées à l'équation du mouvement de chaque corps  $j$  immergé ou flottant (avec  $N$  le nombre total de corps) :

$$\mathbf{M}_j \ddot{\boldsymbol{\eta}}_j = \mathbf{F}_j \quad (18)$$

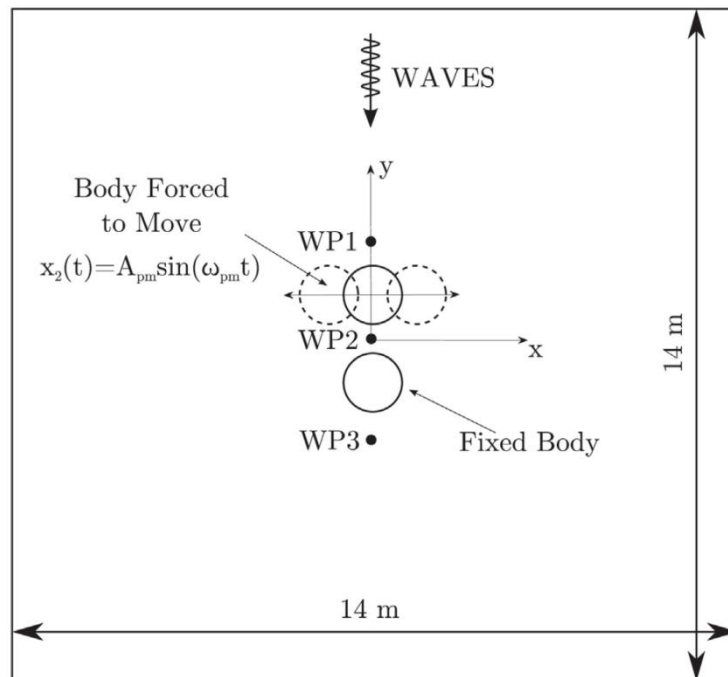
Les équations 16, 17 et 18 forment le deuxième problème aux éléments frontières à résoudre.

Cette théorie est implémentée dans le code *WS\_CN* de l'*Ecole Centrale de Nantes*. Ce code a été étendu aux simulations numériques faisant intervenir plusieurs corps immergés et/ou flottants. Les données expérimentales issues des essais en bassin de Watai et al. à l'université de Sao Paulo sont utilisées pour la validation de ce développement [25]. Le dispositif expérimental comprend deux cylindres de 40 cm de diamètre et 20 cm de tirant d'eau séparé par 60 cm centre à centre : l'un est fixe (Cylindre 1) tandis que l'autre a un mouvement forcé harmonique d'amplitude 37 cm et de pulsation 0.427 rad/s (Cylindre 2). Le mouvement se fait perpendiculairement à l'axe centre à centre des cylindres. Une houle régulière est présente de direction l'axe des cylindres en configuration initiale, d'amplitude 0.0115 m et de pulsation 6.4 rad/s. Trois sondes à houle sont utilisées : en amont du Cylindre 1, en aval du Cylindre 2 ainsi qu'entre les deux cylindres. La figure 4 montre un schéma du dispositif expérimental. La figure 5 expose le maillage initial utilisé.

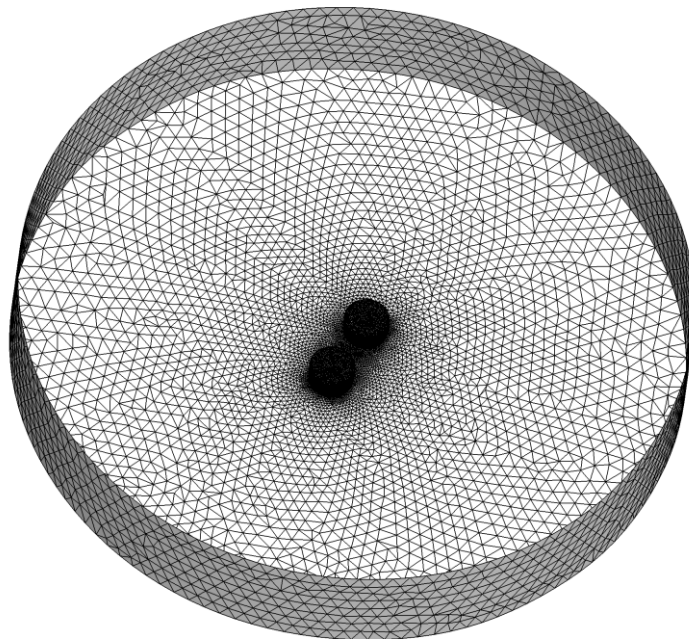
Après avoir pris soin de vérifier les convergences en maillage et en temps, les comparaisons entre les données expérimentales et les résultats numériques de *WS\_CN* sont présentées sur les figures 6 et 7. Un très bon accord est observé, notamment au niveau de la modulation des efforts hydrodynamiques dans l'axe du mouvement du Cylindre 1 ainsi que de l'élévation de surface libre entre les deux



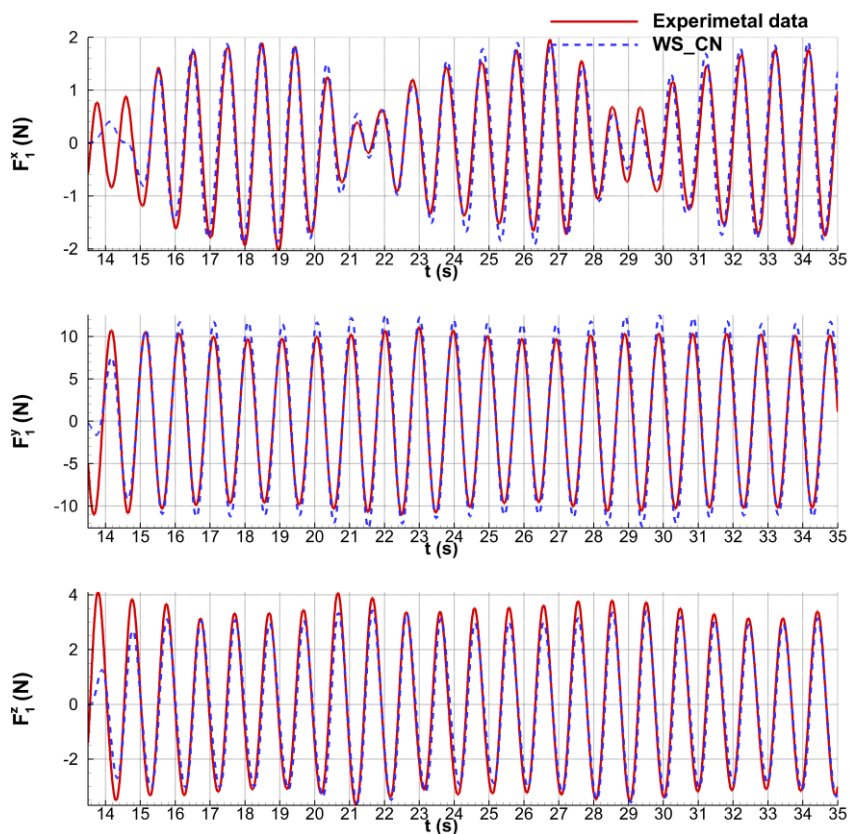
cylindres. Des surestimations apparaissent, probablement dues aux hypothèses du modèle fluide (fluide non-visqueux, écoulement irrotationnel) et à l'hypothèse de faible perturbation.



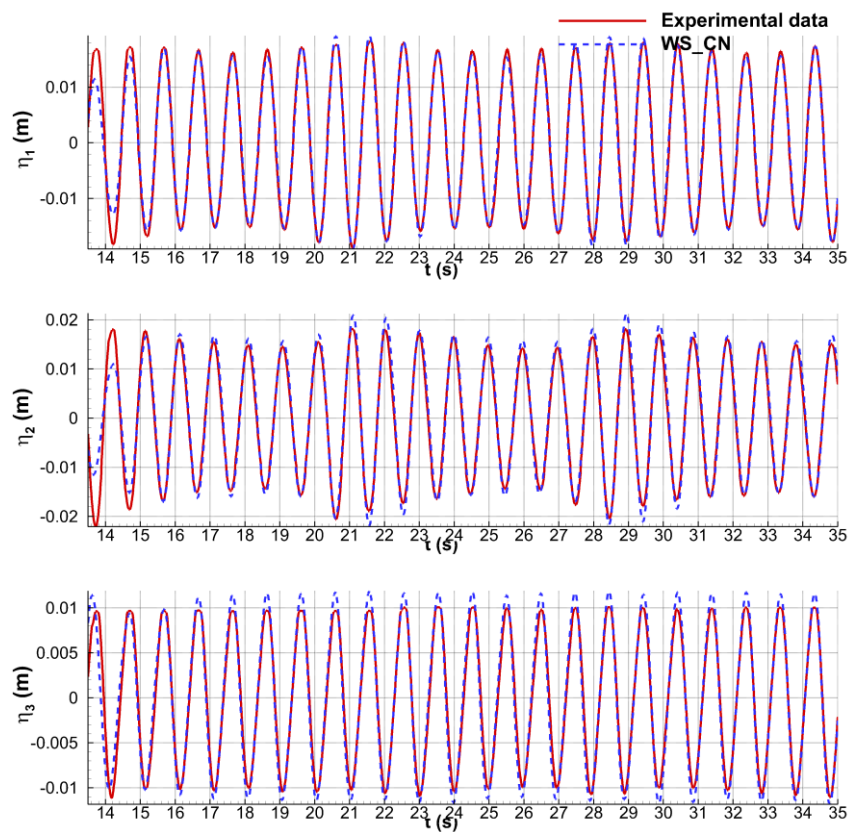
**Figure 4** : Schéma vu de haut du dispositif expérimental [24]



**Figure 5** : Vue du dessous du maillage total



**Figure 6** : Comparaison des séries temporelles des efforts hydrodynamiques du Cylindre 1 à partir des résultats numériques et expérimentaux



**Figure 7** : Comparaison des séries temporelles des élévations de surface libre aux trois sondes à houle à partir des résultats numériques et expérimentaux

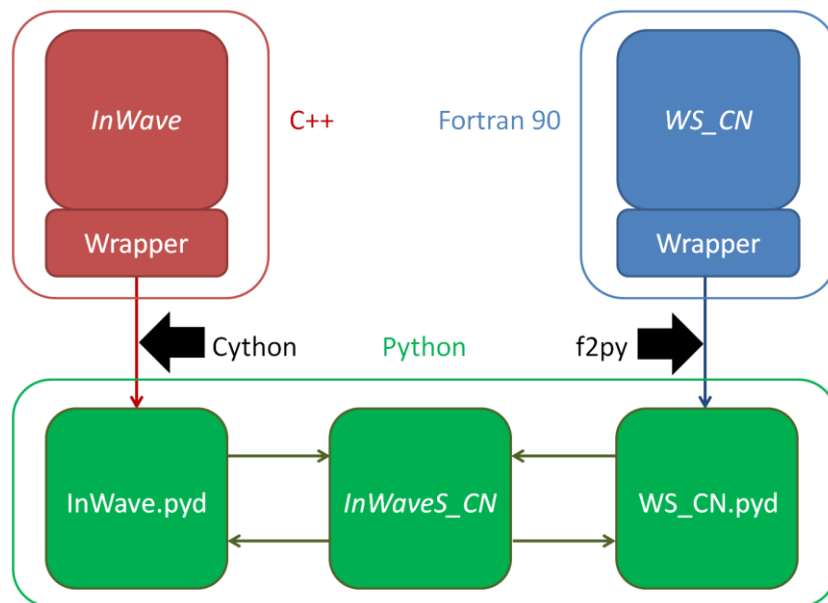
## 5 Interaction fluide-structure

La théorie des écoulements potentiels basés sur l'hypothèse de faible perturbation et l'Algorithme aux Corps Rigides Composites sont couplés afin de calculer l'interaction fluide-structure d'un système multicorps ayant un mouvement relatif de grande amplitude dans la houle. Un couplage fort est choisi pour sa robustesse. L'équation de couplage rassemble l'équation du mouvement du système multicorps (Equation 1) ainsi que le deuxième problème aux éléments frontières (équations 16 et 17) :

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{\phi}^P(M)\Omega(M) + \iint_S \dot{\phi}_n^P(P)G(M,P)dS - \iint_S G_n(M,P)\dot{\phi}^P(P)dS = 0 \\ \dot{\phi}_n^P = -\dot{\phi}_n^I + \mathbf{CK}_j\ddot{\eta}_j + q_j \\ \mathbf{H}(\mathbf{q}) \begin{pmatrix} {}^0\dot{\mathbf{V}}_0 \\ \ddot{\mathbf{q}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{0}_{6 \times 1} \\ \mathbf{r} \end{pmatrix} - \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \end{array} \right. \quad (19)$$

La passage des coordonnées Cartésiennes ( $\ddot{\eta}_j$ ) aux coordonnées relatives ( $\ddot{\mathbf{q}}$ ) est détaillé dans [22].

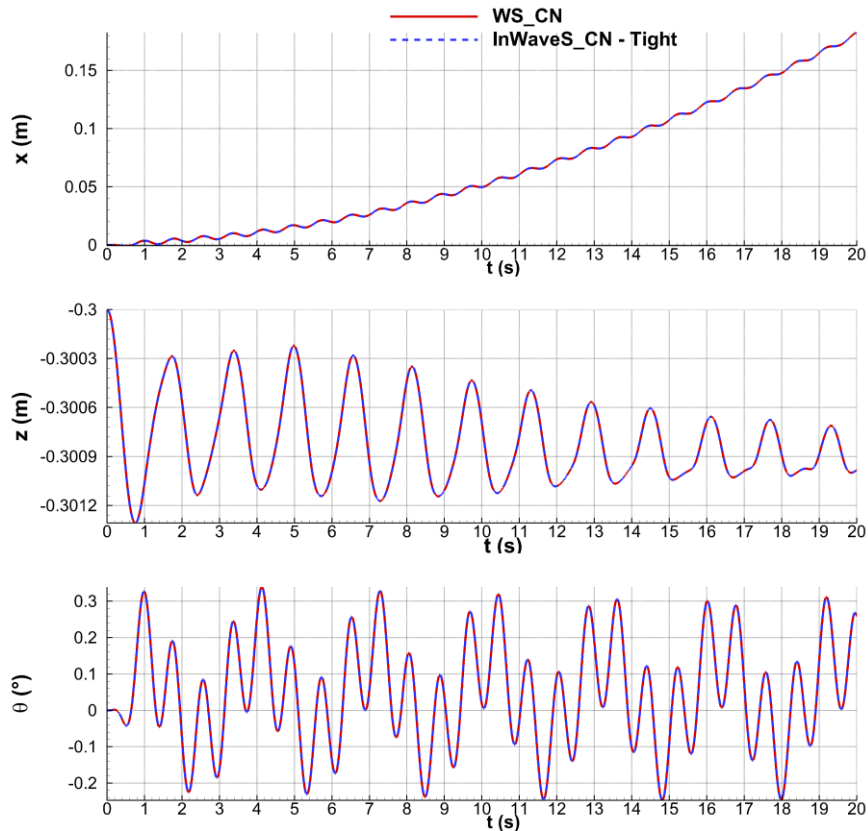
*InWave* est implémenté en C++ alors que *WS\_CN* l'est en Fortran, par conséquent il est nécessaire d'assurer les communications entre les deux solveurs. Afin de garantir la modularité du logiciel, le code d'intégration est en Python. A cet effet, *InWave*, respectivement *WS\_CN*, est compilé en une bibliothèque Python (\*.pyd) en utilisant le programme *Cython*, respectivement *f2py*. Le système d'équations différentielles (Equation 19) est créé et résolu dans un nouveau logiciel : *InWaveS\_CN*. La figure 8 présente ce couplage informatique entre *InWave* et *WS\_CN* via Python.



**Figure 8** : Couplage information entre *InWave* et *WS\_CN* en utilisant Python comme code d'intégration. Les couleurs rouge, verte et bleue représentent les langages C++, Python et Fortran.

Afin de valider ce couplage, une comparaison est faite entre *InWaveS\_CN* et *WS\_CN* seul. Deux cylindres de rayon 20 cm, de tirant d'eau 50 cm, de masse 64.4 kg et d'inertie 10 kg.m<sup>2</sup> sont dans la houle en mouvement libre. De la houle régulière est générée dans la direction perpendiculaire aux

cylindres. Chaque cylindre a trois degrés de liberté : cavement, pilonnement et tangage. Les deux cylindres sont séparés d'un mètre centre à centre. La figure 9 présente la comparaison des séries temporelles issues des deux logiciels. Un parfait accord est obtenu, prouvant la bonne implémentation de l'équation de couplage (Equation 19).



**Figure 9** : Comparaison des séries temporelles des mouvements d'un des deux cylindres à partir des résultats numériques d'*InWaveS\_CN* et *WS\_CN*

## 6 Validation expérimentale

Afin de valider le couplage entre *InWave* et *WS\_CN* implémenté dans *InWaveS\_CN*, des essais en bassin ont été menés à l'École Centrale de Nantes. Ces expériences représentent une opération de redressement dans la houle d'un flotteur d'éolienne de type spar (cylindre). Elles se déroulent en trois étapes :

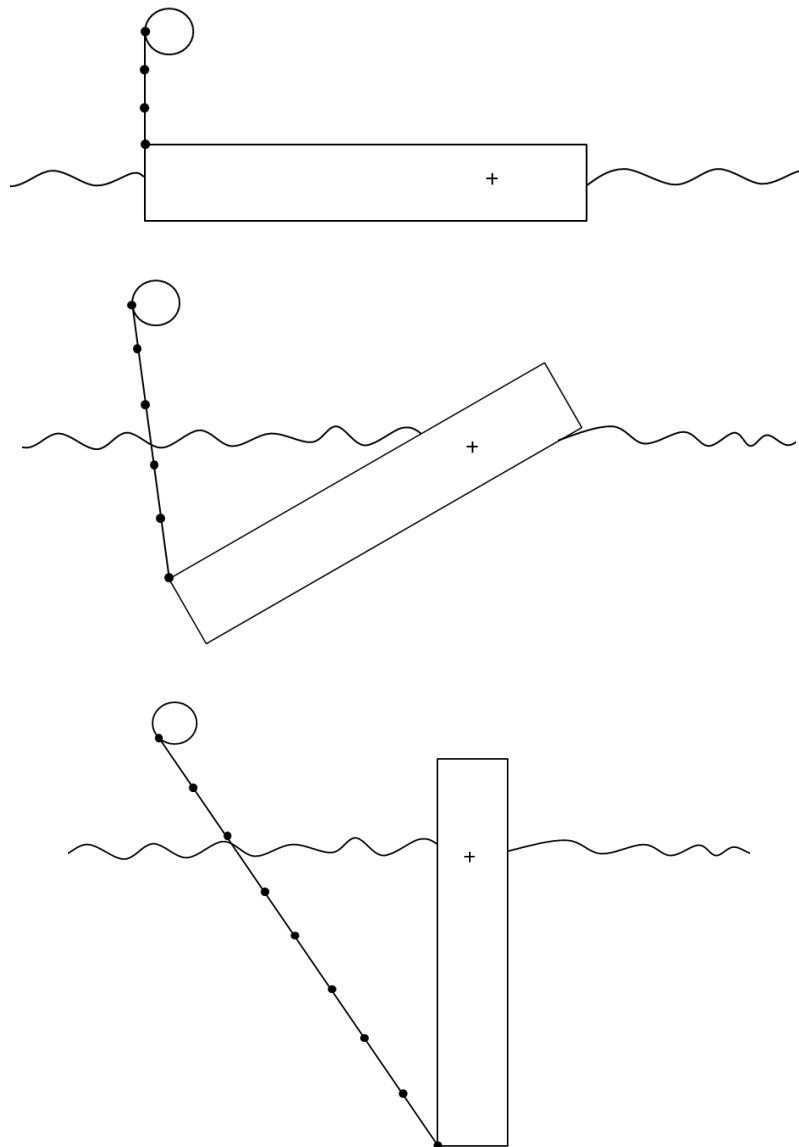
- Au début des expériences, le cylindre est maintenu horizontal grâce à un câble (Figure 10, haut) ;
- Le câble est déroulé grâce à un treuil, le cylindre a un mouvement de rotation autour d'un axe fixe (Figure 10, centre) ;
- Le cylindre atteint sa position d'équilibre verticale (Figure 10, bas).

Ces expériences sont pertinentes au regard du modèle développé précédemment car il y a :

- Un système mécanique articulé (le cylindre et l'axe fixe) ;
- Un câble et un treuil ;
- Un corps soumis à des efforts hydrodynamiques avec un mouvement de grande amplitude ;

- Le corps est en mouvement libre donc il est nécessaire de calculer le couplage fluide-structure à partir de l'équation 19.

Le dispositif expérimental est présenté sur la figure 11. Le cylindre mesure 1.32 m, sa masse est de 28 kg, son centre de gravité est situé à 37 cm de l'extrémité du cylindre. Le câble est fixé à cette même extrémité et est considéré comme rigide. Une houle régulière d'amplitude 1 cm et de période 1 s se propage parallèlement à l'axe du cylindre. La vitesse de déroulement du câble est de 3.3 cm/s avec une rampe linéaire de 3 s. Les comparaisons entre les résultats numériques et les données expérimentales concernant la vitesse du treuil, la tension dans le câble et la position angulaire sont montrées sur les figures 12 et 13. Un bon accord est observé. La tension initiale est bien obtenue. L'effet des vagues est bien capturé dans la tension du câble, de même que l'influence du treuil à travers la vitesse de déroulement et sa rampe. Que ça soit lors des expériences ou des simulations numériques, la position angulaire du cylindre n'est pas affectée par la houle. Les simulations numériques s'arrêtent lorsque l'extrémité du cylindre traverse la surface de l'eau.



**Figure 10** : Trois étapes du redressement d'un flotteur de type spar. L'axe fixe est indiqué par une croix, le treuil par un cercle.



Figure 11 : Dispositif expérimental

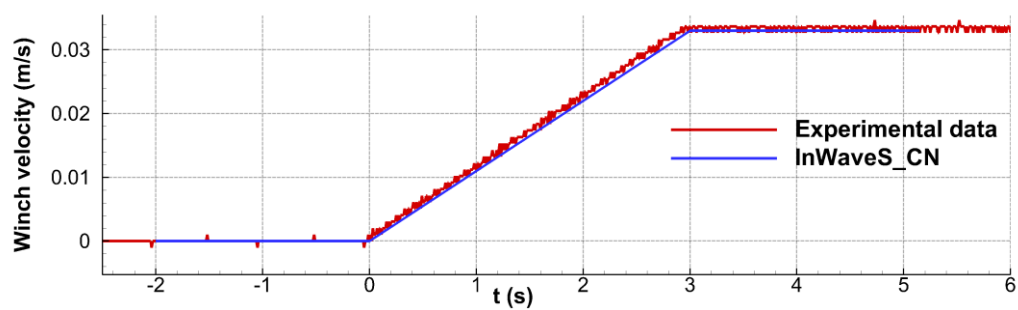
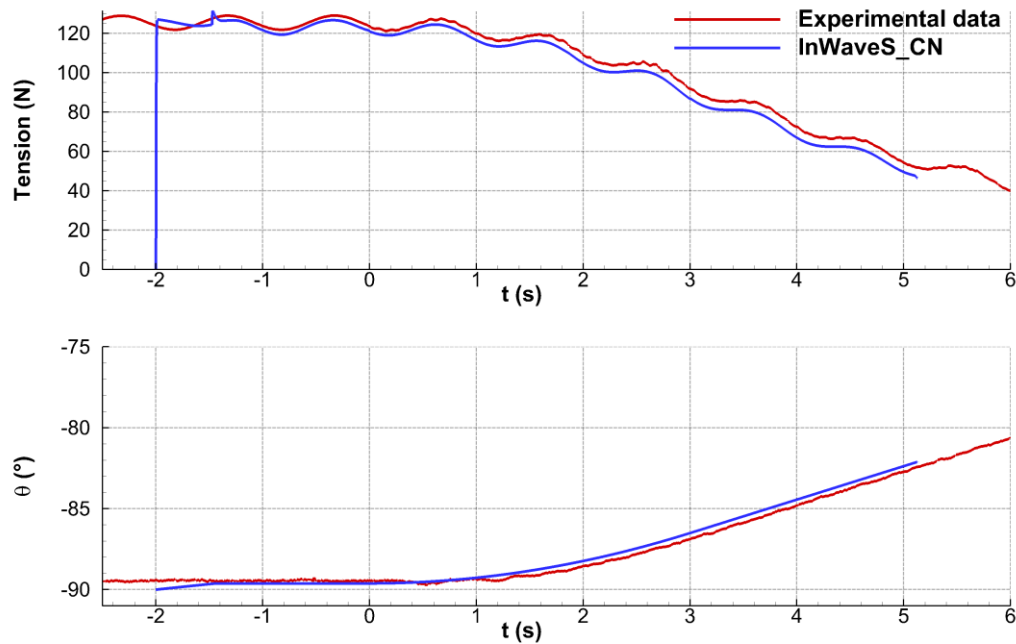


Figure 12 : Comparaison des séries temporelles de la vitesse de déroulement du câble à partir des résultats expérimentaux et numériques.  $t = 0$  s représente l'instant où le treuil s'actionne.



**Figure 13** : Comparaison des séries temporelles de la tension du câble et de la position angulaire à partir des résultats expérimentaux et numériques.  $t = 0$  s représente l'instant où le treuil s'actionne.

## 6 Conclusion

Ce papier présente un nouveau modèle pour la simulation numérique des opérations marines complexes et en particulier les opérations de descente ou de remontée de colis lourds en mer. De par la nature de ces opérations marines, il est nécessaire de modéliser l'interaction mécanique entre les corps (dynamique multicorps), la dynamique des câbles et du treuil, l'interaction hydrodynamique entre des corps avec un grand mouvement relatif ainsi que le couplage fluide-structure. Le modèle utilisé repose sur un solveur mécanique (*InWave*) basé sur l'Algorithme aux Corps Rigides Composites et un solveur hydrodynamique (*WS\_CN*) utilisant la théorie des écoulements potentiels basés sur l'hypothèse de faible perturbation dite « weak-scatterer ». Ce solveur hydrodynamique a fait l'objet d'une extension aux simulations multicorps et a été validé par rapport à des expériences tirées de la littérature. L'interaction fluide-structure entre *InWave* et *WS\_CN* est résolue via un couplage fort dans le logiciel *InWaveS\_CN*. Des essais en bassin d'une opération de redressement d'un flotteur d'éolienne de type spar ont menés à l'*Ecole Centrale de Nantes* et sont utilisés valider ce couplage. Un bon accord est obtenu entre les expériences et les résultats numériques.

## Références

- [1] C. Crabtree, D. Zappalá, and S. Hogg. Wind energy: UK experiences and offshore operational challenges. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, 229(7):727-746, 2015. doi:10.1177/0957650915597560.
- [2] R. E. Elling and A. McClinton. Dynamic loading of shipboard cranes. In *IEEE International Conference on Engineering in the Ocean Environment*, pages 174-177, 1973. doi:10.1109/OCEANS.1973.1161241.

- [3] T. E. Schellin, T. Jiang, and S. D. Sharma. Crane ship response to wave groups. *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, 113(3):211\_218, 1991. doi:10.1115/1.2919922.
- [4] K. Ellermann, E. Kreuzer, and M. Markiewicz. Nonlinear dynamics of floating cranes. *Nonlinear Dynamics*, 27(2):107\_183, 2002. doi: 10.1023/A:1014256405213.
- [5] T. E. Schellin, T. Jiang, and C. Ostergaard. Response analysis and operating limits of crane ships. *Journal of Ship Research*, 37(3):225\_238, 1993.
- [6] H. J. J. Van Den Boom, J. N. Dekker, and R. P. Dallinga. Computer analysis of heavy lift operations. In *Offshore Technology Conference*, 1988. doi: 10.4043/5819-MS.
- [7] J. A. Witz. Parametric excitation of crane loads in moderate sea states. *Ocean Engineering*, 22(4):411-420, 1995. doi: 10.1016/0029-8018(94)00015-Y.
- [8] N. Ku and S. Ha. Dynamic response analysis of heavy load lifting operation in shipyard using multi-cranes. *Ocean Engineering*, 83:63\_75, 2014. doi: 10.1016/j.oceaneng.2014.03.026.
- [9] S.-H. Ham, M.-I. Roh, H. Lee, and S. Ha. Multibody dynamic analysis of a heavy load suspended by a floating crane with constraint-based wire rope. *Ocean Engineering*, 109:145\_160, 2015. doi: 10.1016/j.oceaneng.2015.08.050.
- [10] N. Ku and M.-I. Roh. Dynamic response simulation of an offshore wind turbine suspended by a floating crane. *Ships and Offshore Structures*, 10(6):621\_634, 2015. doi: 10.1080/17445302.2014.942504.
- [11] T. E. Schellin, T. Jiang, and C. Ostergaard. Response analysis and operating limits of crane ships. *Journal of Ship Research*, 37(3):225\_238, 1993.
- [12] H. J. J. Van Den Boom, J. N. Dekker, and R. P. Dallinga. Computer analysis of heavy lift operations. In *Offshore Technology Conference*, 1988. doi: 10.4043/5819-MS.
- [13] J.-H. Cha, M.-I. Roh, and K.-Y. Lee. Dynamic response simulation of heavy cargo suspended by a floating crane based on multibody system dynamics. *Ocean Engineering*, 37(14):1273\_1291, 2010. doi: 10.1016/j.oceaneng.2010.06.008.
- [14] M. A. Hannan. Numerical simulation of submerged payload coupled with crane barge in waves. PhD thesis, National university of Singapore, 2014.
- [15] OrcaFlex Manual v10.0a. Orcina Ltd., 2015.
- [16] DeepLines 4.5 Theory Manual. Principia and IFP Energies Nouvelles, 2011.
- [17] SIMO - Theory Manual Version 3.6, rev: 2, 2009.
- [18] P.-Y. Wuillaume, F. Rongère, A. Babarit, M. Philippe, P. Ferrant. Development and adaptation of the Composite Rigid Body Algorithm and the weak-scatterer approach in view of the modeling of marine operations, In *Proceedings of the 23<sup>ème</sup> Congrès Français de Mécanique, CFM 2017*.
- [19] A. Combourieu, M. Philippe, F. Rongère, and A. Babarit. InWave: a new flexible design tool dedicated to wave energy converters. In *Proceedings of the ASME 2014 33rd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, OMAE2014*, 2014. doi: 10.1115/OMA2014-24564.
- [20] M. Masciola, J. Jonkman, and A. Robertson. Extending the capabilities of the mooring analysis program: A survey of dynamic mooring line theories for integration into FAST. In *Proceedings of the ASME 2014 33rd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, OMAE2014*, 2014. doi:10.1115/OMA2014-23508.
- [21] M. Hall and A. Goupee. Validation of a lumped-mass mooring line model with DeepCwind semisubmersible model test data. *Ocean Engineering*, 104:590\_603, 2015. doi: 10.1016/j.oceaneng.2015.05.035.
- [22] P.-Y. Wuillaume. Simulation numérique des opérations d'installations pour les fermes d'éoliennes offshore. PhD thesis, Ecole Centrale de Nantes, 2019.
- [23] L. Letournel. Développement d'un outil de simulation numérique basé sur l'approche weak-scatterer pour l'étude des systèmes houlomoteurs en grands mouvements. PhD thesis, Ecole Centrale de Nantes, 2015.
- [24] L. Letournel, G. Ducrozet, A. Babarit, and P. Ferrant. Proof of the equivalence of Tanizawa-Berkvens' and Cointe-van Daalen's formulations for the time derivative of the velocity potential for non-linear potential flow solvers. *Applied Ocean Research*, 63:184\_199, 2017. doi: 10.1016/j.apor.2017.01.010.
- [25] R. A. Watai, F. Ruggeri, and A. N. Simos. A new time domain Rankine panel method for simulations involving multiple bodies with large relative displacements. *Applied Ocean Research*, 59:93\_114, 2016. doi: 10.1016/j.apor.2016.05.002.