

SHAKE THE FUTURE.



# Modélisation par la théorie potentielle des interactions vagues/structures pour les systèmes Energies Marines Renouvelables

Aurélien Babarit

# Champ applicatif



## Energie des vagues & éolien flottant

Réponse dynamique de systèmes houlomoteurs et éoliennes flottantes, performance énergétique, chargements, optimisation, contrôle, interactions de vagues, impact environnemental

**Chaines cinématiques complexes, multi-corps, structures déformables, mouvements de grande amplitude.**

## Opérations marines

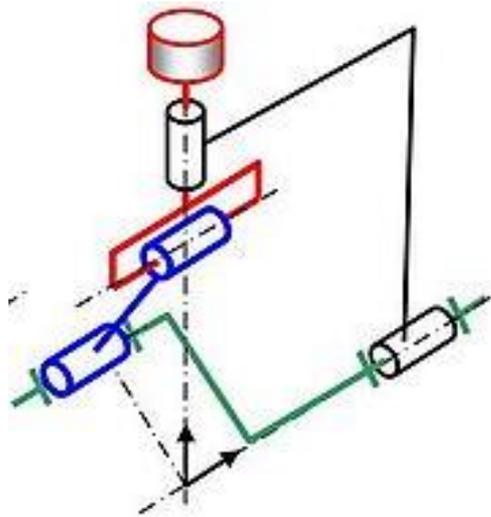
Simulation d'opérations d'installation, contrôle, réalité virtuelle, réalité augmentée, formation

**Chaines cinématiques complexes, multi-corps, mouvements de grande amplitude, interactions de vagues, instationnarité, slamming**



# Enjeux

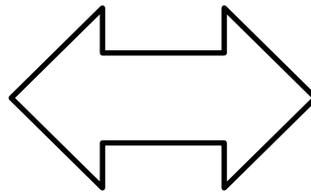
Simulation dynamique de problèmes multi-corps et à chaînes cinématiques complexes



Calcul des chargements dus aux interactions vagues/structures



Couplage fort (masse d'eau ajoutée)

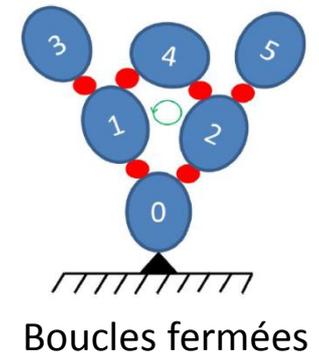
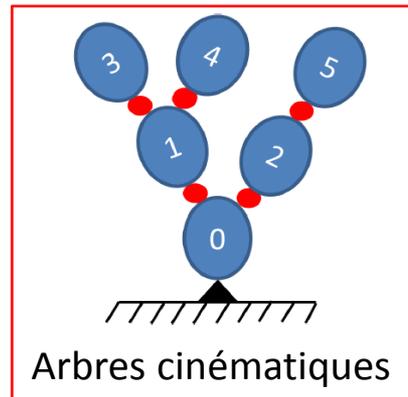
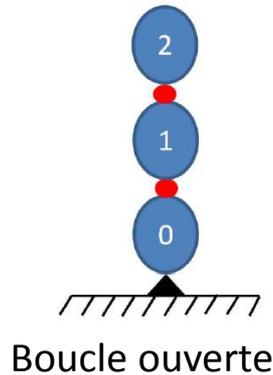


Contraintes d'ingénierie:

1. Temps de calcul  $\leq$  Temps physique
2. Robustesse

# Simulation multi-corps

## Classes de systèmes multi-corps



## Méthodes pour arbres cinématiques

- Corps indépendants + contraintes cinématiques
  - 6 ddls par corps, coordonnées absolues, équations de contraintes, résolution par méthodes implicites (itératives)
- Articulated bodies algorithm
  - # ddls = # d'articulations, coordonnées relatives, résolution par méthodes explicites (directes)

# Calcul des interactions vagues/structures

Temps calcul /  
temps physique



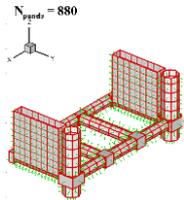
Temps réel → 1



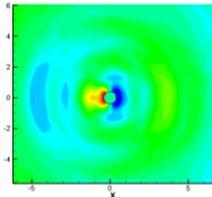
- Souvent, les approches basées sur la théorie potentielle sont les seuls viables du point de vue de l'ingénierie pour le dimensionnement des systèmes EMRs
- Leurs limitations sont palliées avec des corrections ad-hoc



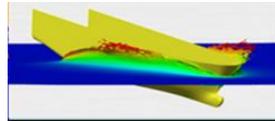
Théorie potentielle linéarisée en fréquentiel (WAMIT, NEMOH, ...)



Théorie potentielle linéaire en temporel & corrections à la Morison (LAMP1-2, Orcaflex, Deeplines, WEC-SIM, InWave, Proteus3D, ...)

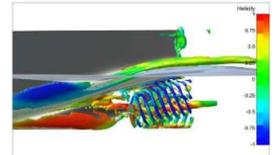


Théorie potentielle non-linéaire (LAMP3-4, AEGIR, WISH, ...)

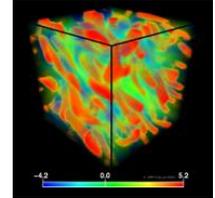


LES  
SPH (SPH-Flow, SPHYSICS, ...)

Approches RANSE (StarCCM+, FLUENT, ISIS-CFD, ICARE-SWENSE, OPENFOAM...)



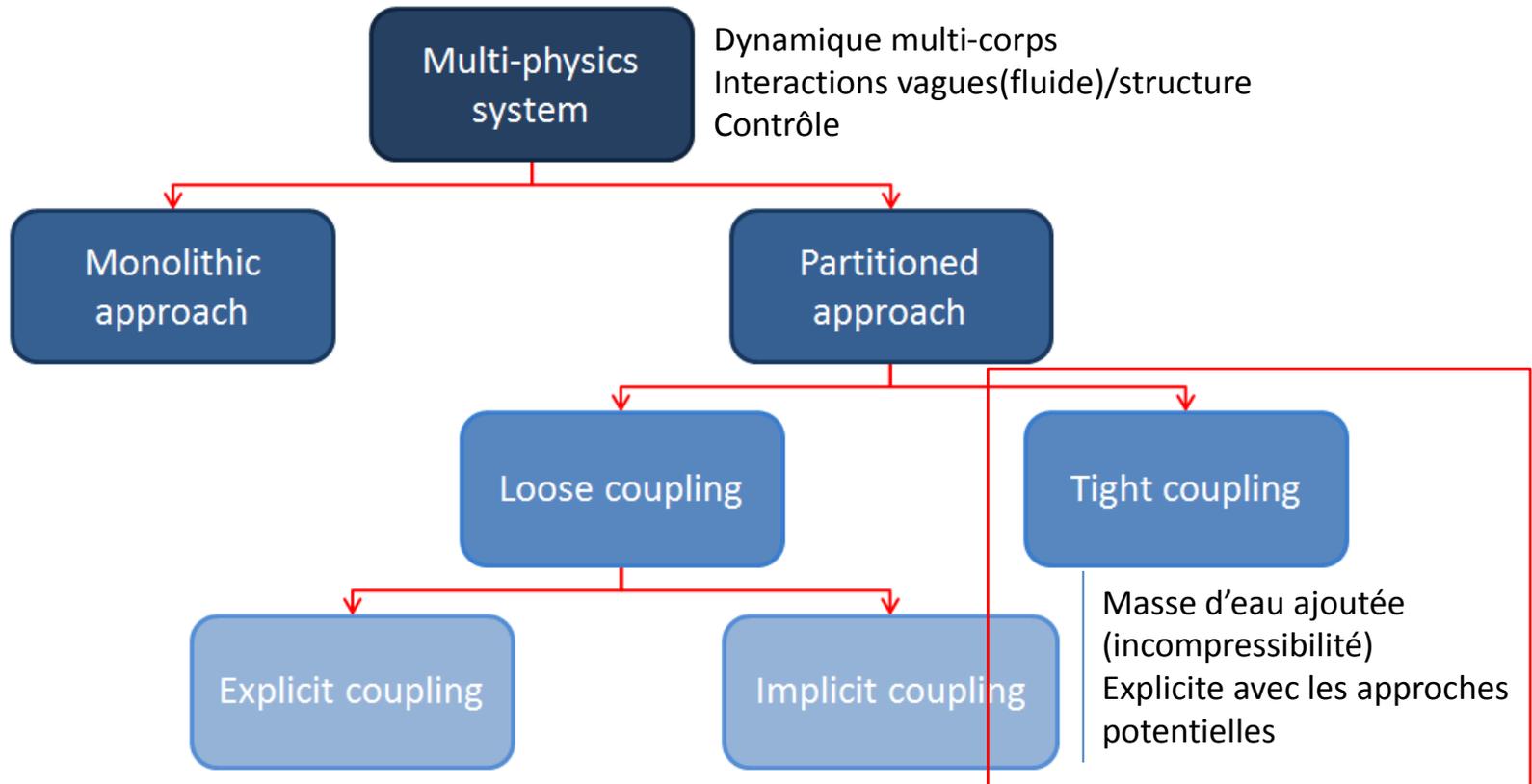
DNS



Beaucoup d'hypothèses sur l'écoulement

Peu/pas d'hypothèses sur l'écoulement

# Couplage multicorps – interactions vagues/struct



# Théorie des écoulements potentiels

## Hypothèses:

Fluide parfait (non visqueux) :  $\nu = 0$

Écoulement incompressible et irrotationnel : 
$$\begin{cases} \vec{\nabla} \cdot \vec{V} = 0 \\ \vec{\nabla} \times \vec{V} = \vec{0} \end{cases}$$

→ La vitesse dérive d'un potentiel :  $\vec{V} = \vec{\nabla}\Phi$

→ La pression est obtenue par la relation de Bernoulli :

$$p + \rho g z + \frac{1}{2} (\vec{\nabla}\Phi)^2 + \rho \frac{\partial \Phi}{\partial t} = \text{Cste}$$

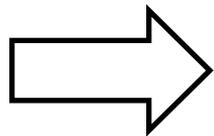
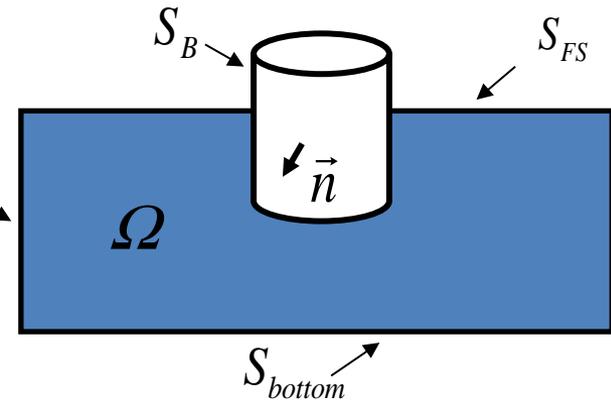
Intérêt ?

L'écoulement est entièrement caractérisé par le champ scalaire  $\Phi \rightarrow 1$  inconnue  $\Phi$  vs 4 inconnues ( $V_x, V_y, V_z$  et  $p$ )

# Théorie des écoulements potentiels

## Problème aux limites

$$\left\{ \begin{array}{ll} \Delta\Phi = 0 & M \in \Omega \quad \leftarrow \text{Dans le volume} \\ \frac{\partial\Phi}{\partial n} = \vec{V} \cdot \vec{n} & M \in S_B \quad \leftarrow \text{Sur le corps } S_B \\ \frac{\partial\Phi}{\partial n} = 0 & M \in S_{bottom} \quad \leftarrow \text{Au fond} \\ \left. \begin{array}{l} \frac{\partial\eta}{\partial n} + \vec{V}\eta \cdot \vec{V}\Phi = 0 \\ \frac{\partial\Phi}{\partial n} + g\eta + \frac{1}{2}(\vec{V}\Phi)^2 = 0 \end{array} \right\} & \begin{array}{l} M \in S_{FS} \\ M \in S_{FS} \end{array} \quad \left. \vphantom{\frac{\partial\eta}{\partial n}} \right\} \text{Conditions de surface libre} \\ \sqrt{R} \left( \frac{\partial\Phi}{\partial n} - ik \right) (\Phi - \Phi_0) \rightarrow 0 & R \rightarrow \infty \quad \leftarrow \text{La perturbation s'annule à l'infini} \end{array} \right.$$



$$\alpha(M)\Phi(M) = \iint_{US} \left( \Phi(M') \frac{\partial G(M, M')}{\partial n'} - G(M, M') \frac{\partial \Phi(M')}{\partial n'} \right) dS'$$

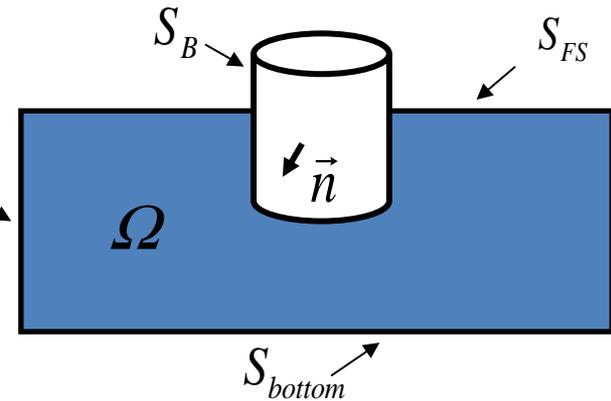
Après un peu de maths  
(3<sup>e</sup> identité de Green)

Fonction de  
Green

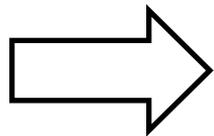
# Théorie des écoulements potentiels

## Problème aux limites

$$\left\{ \begin{array}{ll} \Delta\Phi = 0 & M \in \Omega \\ \frac{\partial\Phi}{\partial n} = \vec{V} \cdot \vec{n} & M \in S_B \\ \frac{\partial\Phi}{\partial n} = 0 & M \in S_{bottom} \\ \frac{\partial\eta}{\partial n} + \vec{\nabla}\eta \cdot \vec{\nabla}\Phi = 0 & M \in S_{FS} \\ \frac{\partial\Phi}{\partial n} + g\eta + \frac{1}{2}(\vec{\nabla}\Phi)^2 = 0 & M \in S_{FS} \end{array} \right. \left. \begin{array}{l} \text{Dans le volume} \\ \text{Sur le corps } S_B \\ \text{Au fond} \\ \text{Conditions de} \\ \text{surface libre} \end{array} \right.$$



**Problème volumique (3D) devient problème surfacique (2D)**  
**→ 1 dimension d'inconnues en moins**

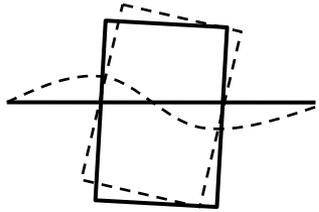


Après un peu de maths  
(3<sup>e</sup> identité de Green)

$$\alpha(M) \Phi(M) = \iint_{\Omega} \left( \Phi(M) \frac{\partial \alpha(M, M')}{\partial n'} - \alpha(M, M') \frac{\partial \Phi(M')}{\partial n'} \right) dS'$$

Fonction de Green

# Les classes d'approximation

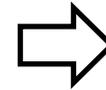


## Linear

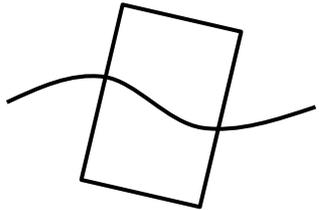
Petits mouvements des corps autour de la position moyenne, vagues de faible cambrure

Equations de SL linéarisées, Conditions sur le corps sur la position moyenne

Résolution dans le domaine fréquentiel, robustesse ++, rapidité ++, précision +- (mais souvent surprenante même dans si on s'écarte du champ des hypothèses)



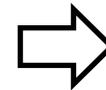
WAMIT,  
Diodore,  
Hydrostar,  
Diffract,  
Aquaplus,  
Nemoh, ...



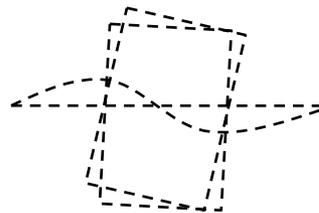
## Fully non linear

Pas de déferlement

Résolution dans le domaine temporel, robustesse +-, rapidité +-, précision ++ (accès aux efforts d'ordre élevé, springing, ringing)



XWAVE,  
LAMP4,  
NWT\_LHSV

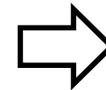


## Froude Krylov non linear

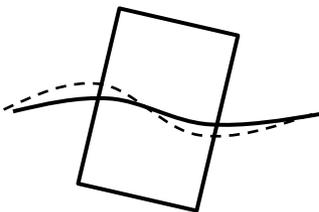
Composante de Froude-Krylov (hydrostatique + dynamique) sur la position instantanée, diffraction/radiation au 1<sup>er</sup> ordre.

Résolution dans le domaine temporel, robustesse +-, rapidité +, précision +-

approche inconsistante (bricolage), stretching



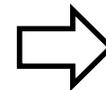
MANAV,  
LAMP2, ...



## Weak-scatterer

Petite perturbation / au champ incident → linéarisation des CSL sur l'élévation de surface libre correspondant au champ incident

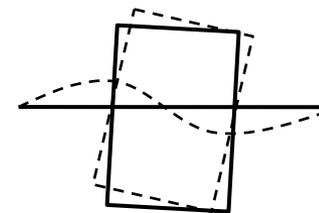
Résolution dans le domaine temporel, robustesse +, rapidité, +-, précision + (Froude Krylov non linear consistant)



WS\_ECN,  
LAMP3,  
AEGIR

## Codes développés à l'ECN

NEMOH (Aquaplus) .....	Linear
XWAVE.....	Fully nonlinear
WS_ECN.....	Weak scatterer



# NEMOH

Code de tenue à la mer pour le calcul des coefficients hydrodynamiques du premier ordre (théorie linéaire)

- Distribution constante de sources sur les panneaux
- Calcul de la partie ondulatoire de la fonction de Green de Kelvin par interpolation dans une table (efficacité numérique)
- Modes généralisés

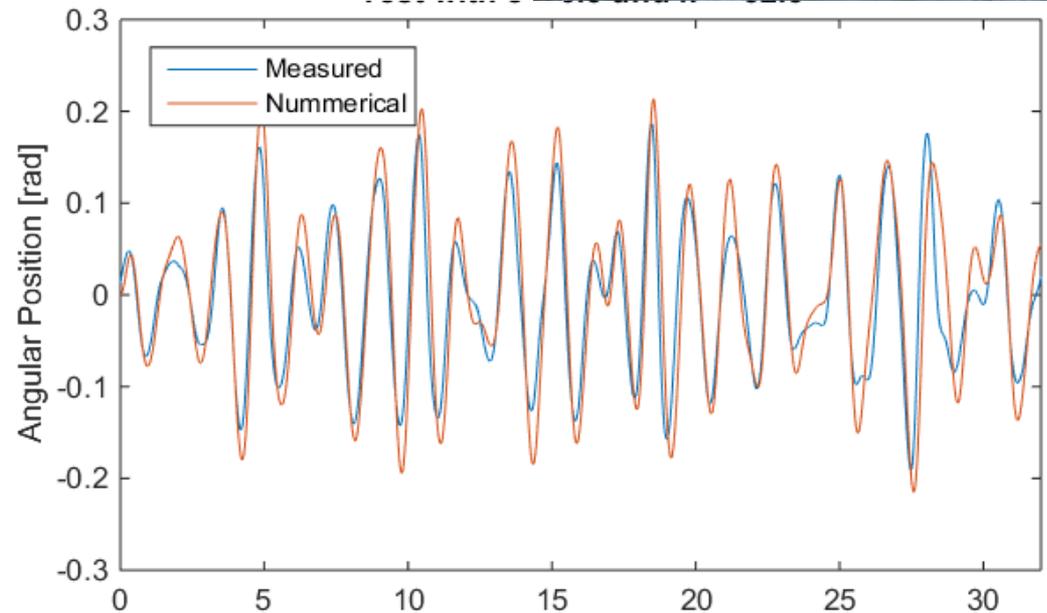
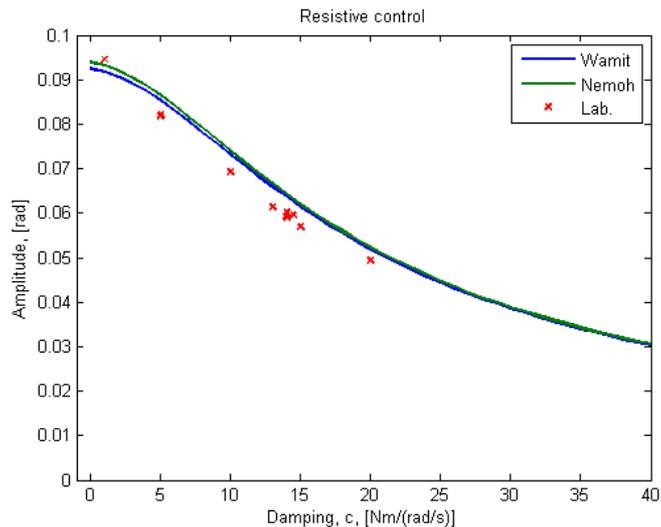
$$\left\{ \begin{array}{ll} \Delta\Phi = 0 & M \in \Omega \\ \frac{\partial\Phi}{\partial n} = f(M) & M \in \overline{S_B} \\ \frac{\partial\Phi}{\partial n} = 0 & M \in S_{bottom} \\ \frac{\partial^2\Phi}{\partial t^2} + g \frac{\partial\Phi}{\partial n} = 0 & z = 0 \\ \sqrt{R} \left( \frac{\partial\Phi}{\partial n} - ik \right) (\Phi - \Phi_0) \rightarrow 0 & R \rightarrow \infty \end{array} \right.$$

## Résultats:

- Coefficients hydrodynamiques du premier ordre (masse d'eau ajoutée, amortissement de radiation, force d'excitation)
- Coefficients de champ lointain, élévation de surface libre, champ de pression

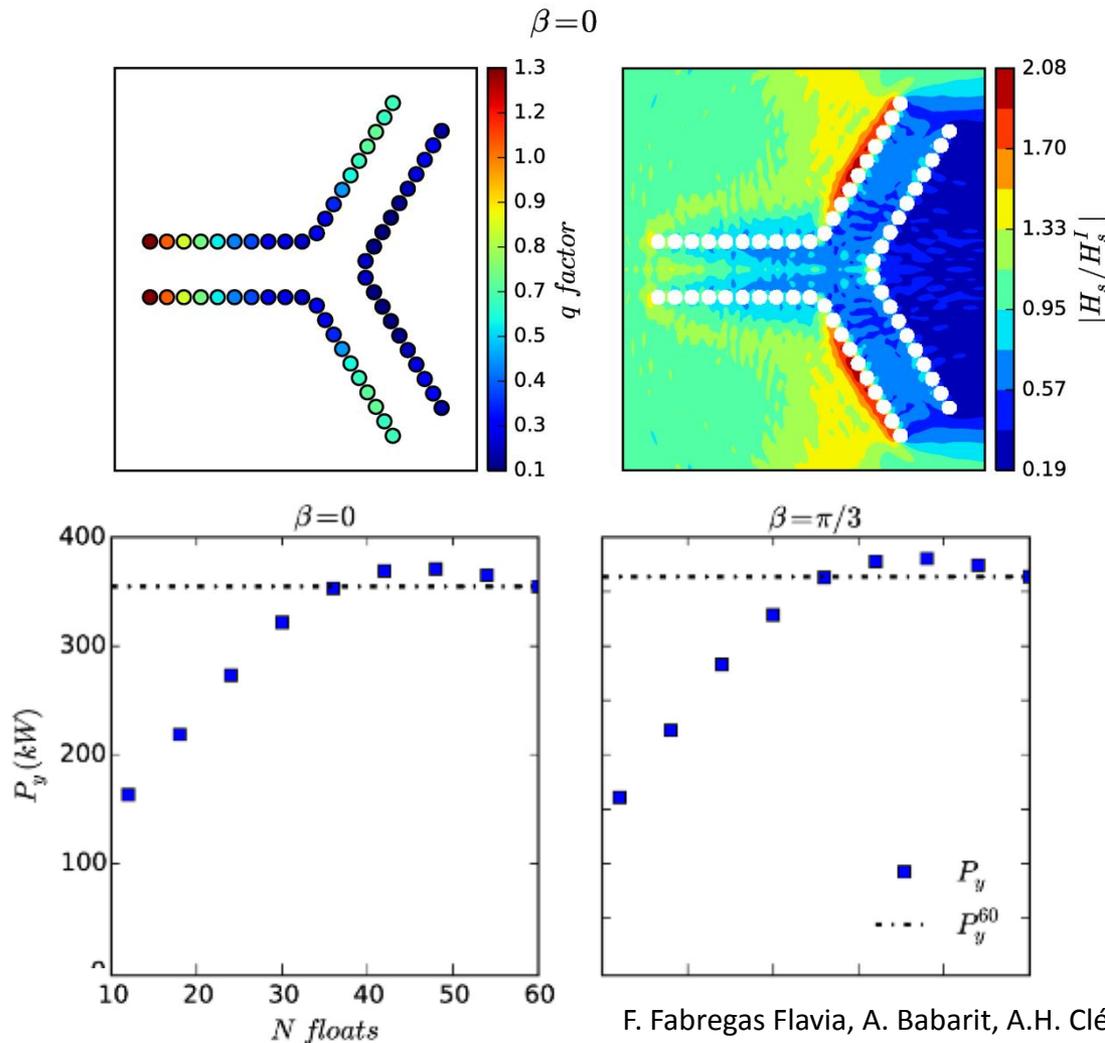
Open-source: <https://lheea.ec-nantes.fr/logiciels-et-brevets/>

# NEMOH: Vérification & Validation



Comparaison essais – simulation pour les mouvements d'une maquette d'un absorbeur du houlomoteur Wavestar. Les coefficients hydrodynamiques ont été calculés avec NEMOH

# NEMOH: Applications

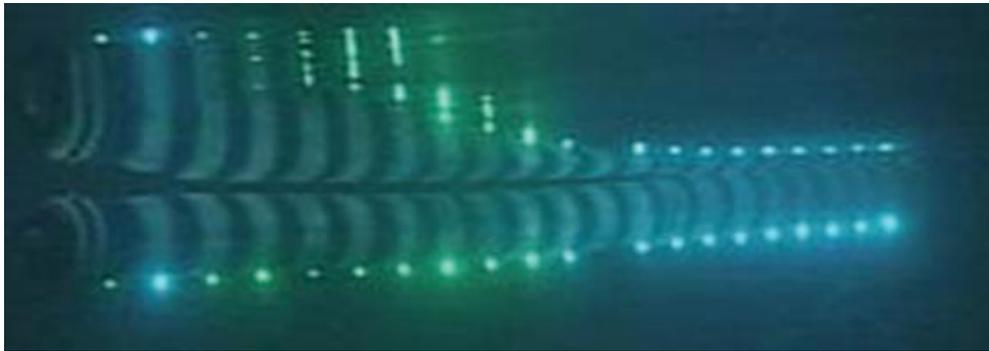


Optimisation de la performance d'un système houlomoteur (nombre d'absorbeurs)

F. Fabregas Flavia, A. Babarit, A.H. Clément (2017) On the numerical modeling and optimization of a bottom-referenced heave-buoy array of wave energy converters. International Journal of Marine Energy, Vol. 19, pp. 1-15

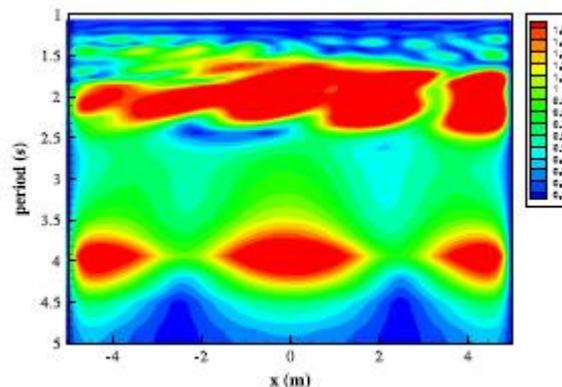
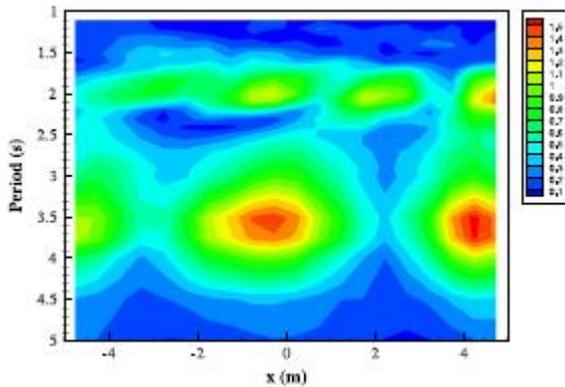
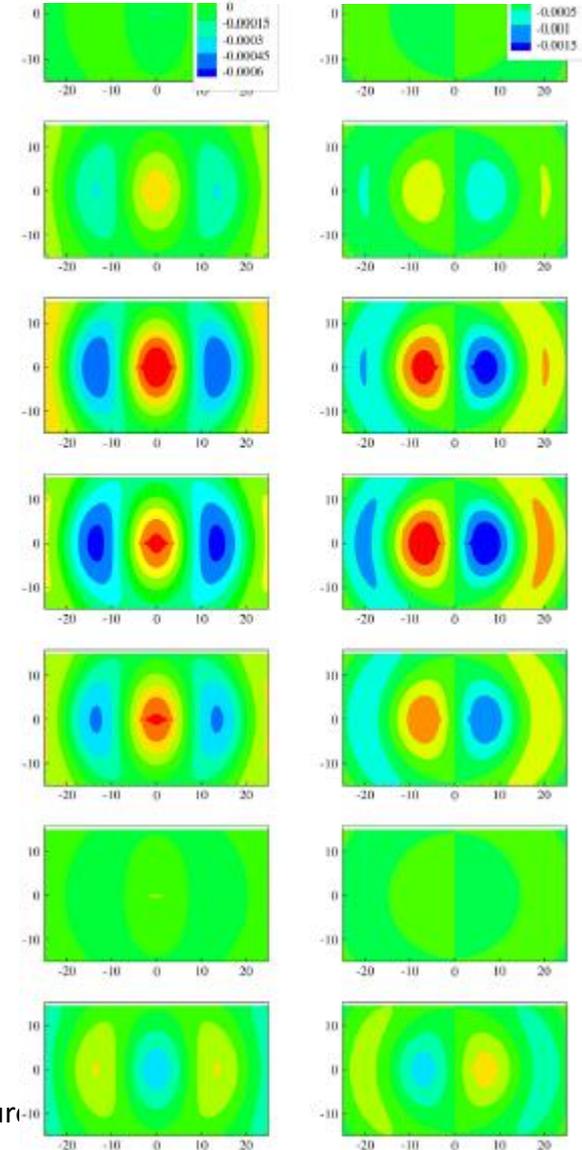
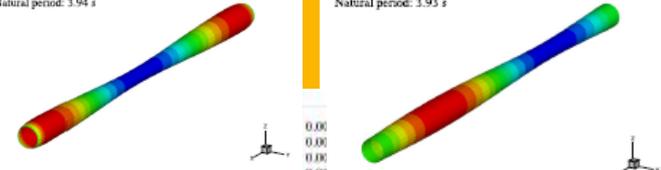
# NEMOH: Applications

Outil de conception pour le système houlomoteur S3



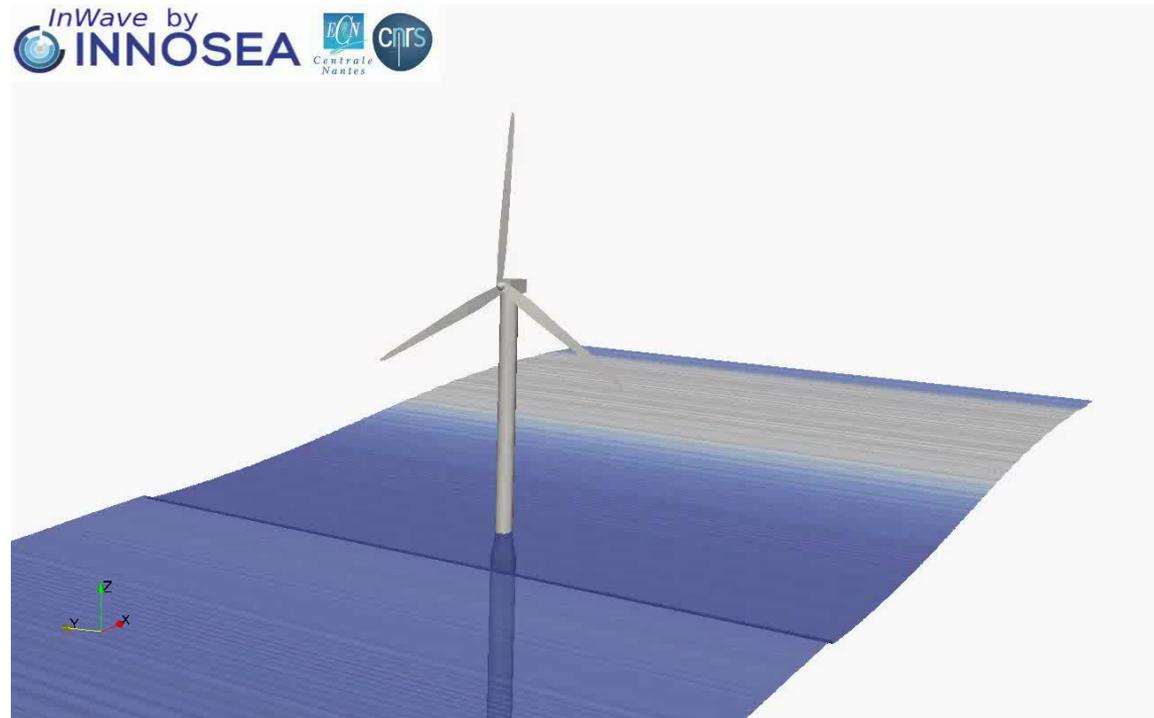
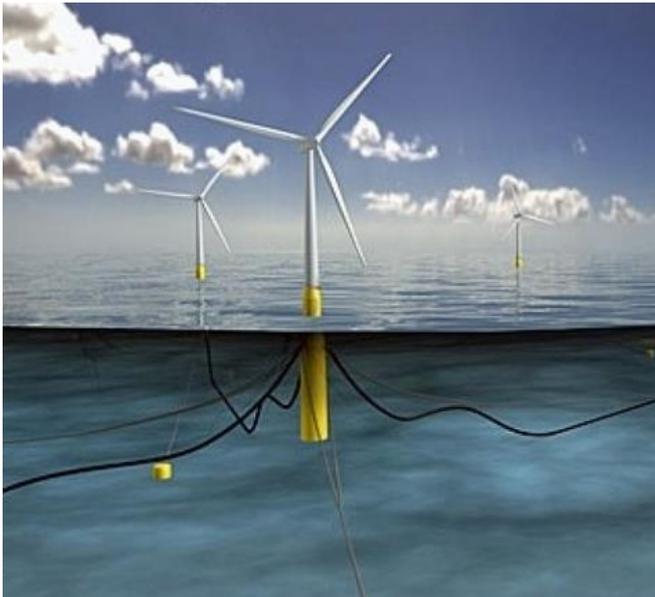
Mode number: 2  
Mode type: 1  
Natural period: 3.94 s

Mode number: 3  
Mode type: 2  
Natural period: 3.93 s



# NEMOH: Applications

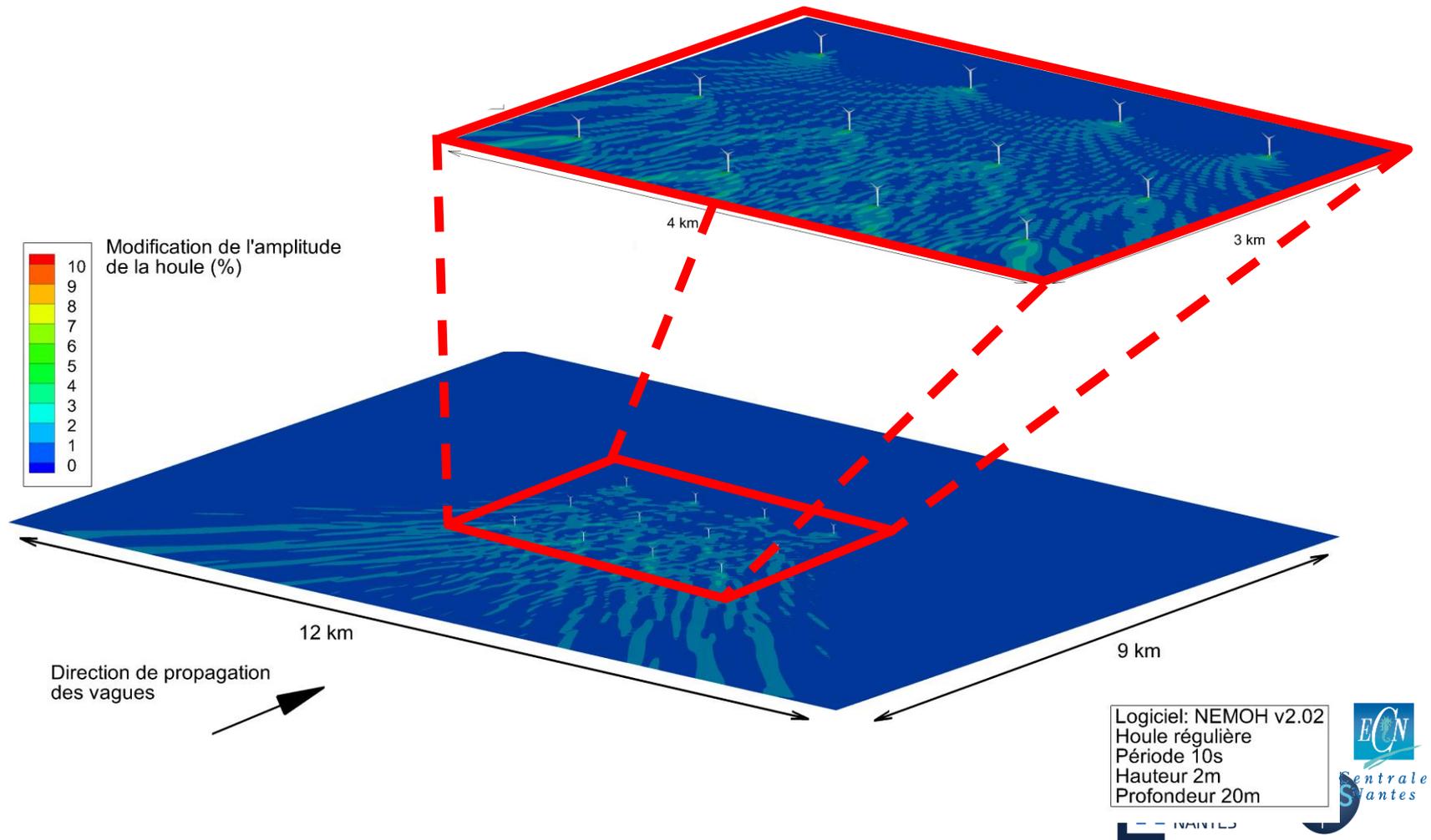
## Tenue à la mer d'une éolienne flottante



V. Leroy, J-C. Gilloteaux, M. Philippe, A. Babarit, P. Ferrant (2017) Development of a simulation tool coupling hydrodynamics and unsteady aerodynamics in order to study floating wind turbines. In Proc. Of the OMAE2017, Trondheim, Norway

# NEMOH: Applications

## Diffraction de la houle par un parc d'éoliennes posées



# NEMOH : Perspectives

## Open-source

Depuis 2015

Fin 2017, 7 000+ utilisateurs

Communauté développeurs

## Développements futurs

Refactoring

Suppression des fréquences irrégulières

Efforts de seconde ordre (QTF+ et QTF-)

Singularités de type doublets

Accélération (/interactions de vagues dans les parcs) par implémentation multiple scattering et/ou résolution fct de Green par équation différentielle

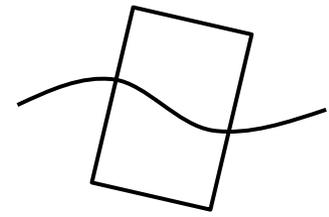
Modèles d'état pour l'approximation de l'IRF



Pour rejoindre la communauté NEMOH:  
<https://lheea.ec-nantes.fr/logiciels-et-brevets/>

## Codes développés à l'ECN

NEMOH (Aquaplus) .....	Linear
XWAVE.....	Fully nonlinear
WS_ECN.....	Weak scatterer

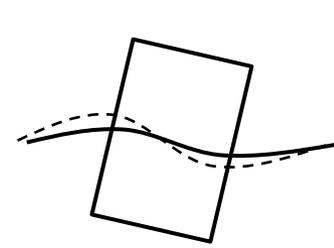


# XWAVE

Solveur en potentiel complètement non-linéaire  
Corps immergés ou cylindre perçant la surface libre  
Mouvement forcé  
En sommeil (pas de développement depuis 15 ans)  
Point de contact: [pierre.ferrant@ec-nantes.fr](mailto:pierre.ferrant@ec-nantes.fr)

## Codes développés à l'ECN

NEMOH (Aquaplus) .....	Linear
XWAVE.....	Fully nonlinear
WS_ECN.....	Weak scatterer



## WS\_ECN

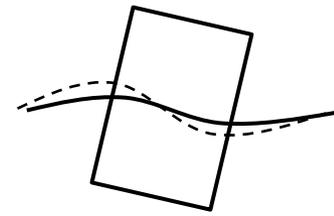
Hypothèse principale: Le champ perturbé est faible / champ incident

Intérêt:

- Grands mouvements (dont horizontaux, chgt de cap, ...)
- Robustesse : pas de problème / déferlement
- Simplicité de maillage et remaillage
- Couplage transparent avec modèles de houle incidente non linéaire (HOS)

Difficulté ?

- Temps de calcul / temps réel : résolution temporelle, matrices pleines à inverser

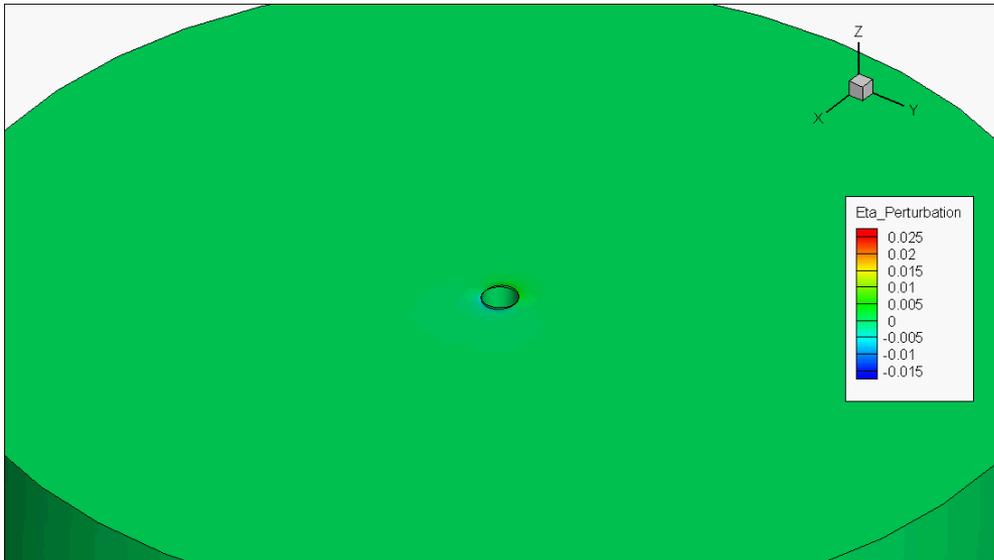


# WS\_ECN

## Caractéristiques principales

- Discrétisation de la géométrie par éléments triangulaires
- Discrétisation linéaire des inconnues sur les facettes
- Calcul des coefficients d'influence par formules analytiques dans le champ proche, quadrature (1 pt de Gauss) dans le champ lointain
- Suivi de surface libre: mixte Euler-Lagrange
- Génération automatique de maillage par méthode d'avance de front
- Déformations de maillage: SL par RBF, analogie ressort pour les nœuds du corps
- Calcul du champ de pression: résolution d'un BVP pour le potentiel d'accélération, condition sur le corps adaptée de Tanizawa et Cointe
- Couplage fort avec INWAVE (Innosea & ECN) pour la simulation de problèmes multi-corps (Articulated Body Algorithm)
- Schéma intégration temporelle: RK4 avec filtrage des instabilités en dents de scie sur la SL

# WS\_ECN : Vérifications



## Géométrie

$$R_{cyl} = 0,4 \text{ m}$$

$$H_{cyl} = 1 \text{ m}$$

$$H_{domaine} = 2 \text{ m}$$

## Mvmt. du flotteur

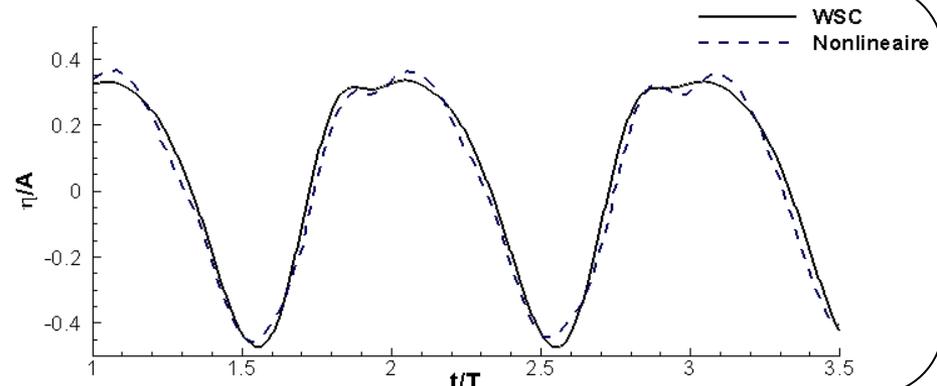
$$\vec{V}_B = A \sin(\omega t) \vec{x}$$

$$A = 0,092 \text{ m}$$

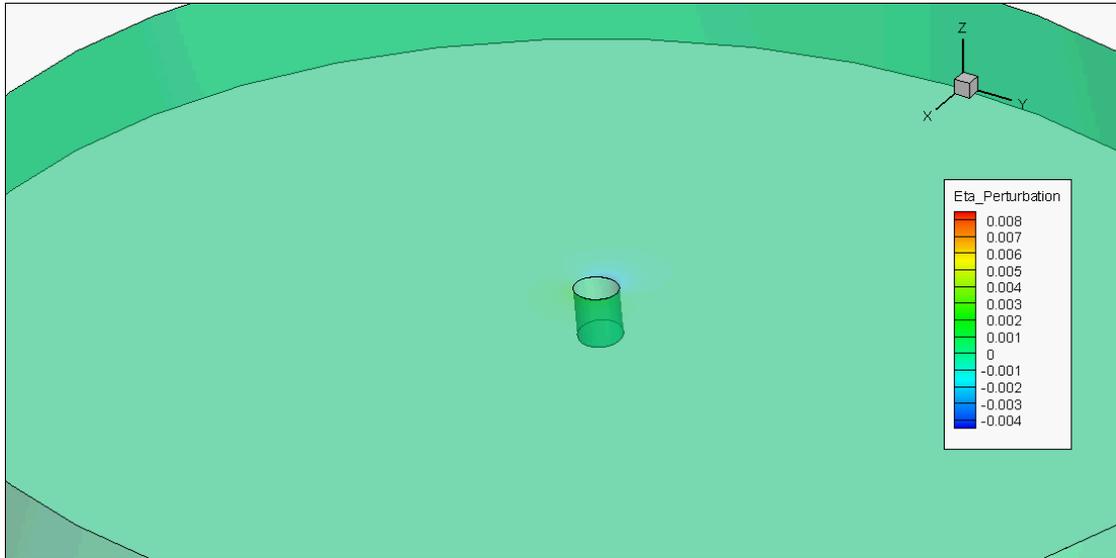
$$\omega = 2,79 \text{ rad/s}$$

### Runup en $x = -R_{cyl}$

Comparaison aux résultats d'un modèle non-linéaire (Zhou 2013)<sup>10</sup>



# WS\_ECN : Vérifications



Mvmt. du flotteur

$$\vec{\Omega}_B = A \sin(\omega t) \vec{y}$$

$$A = 0,15 \text{ rad}$$

$$\omega = 2,79 \text{ rad/s}$$

Géométrie

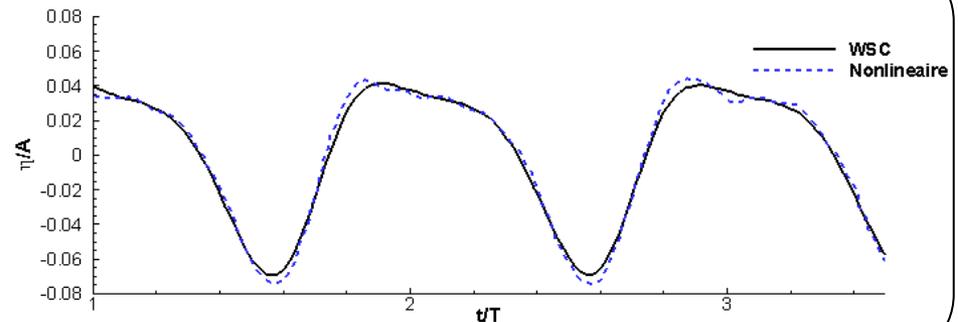
$$R_{cyl} = 0,4 \text{ m}$$

$$H_{cyl} = 1 \text{ m}$$

$$H_{domaine} = 2 \text{ m}$$

■ Runup en  $x = -R_{cyl}$

Comparaison aux résultats d'un modèle non-linéaire (Zhou 2013)<sup>10</sup>

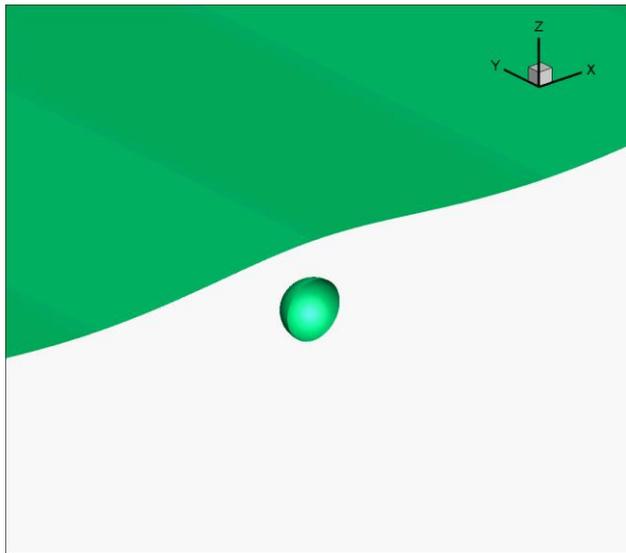


# WS\_ECN : Applications

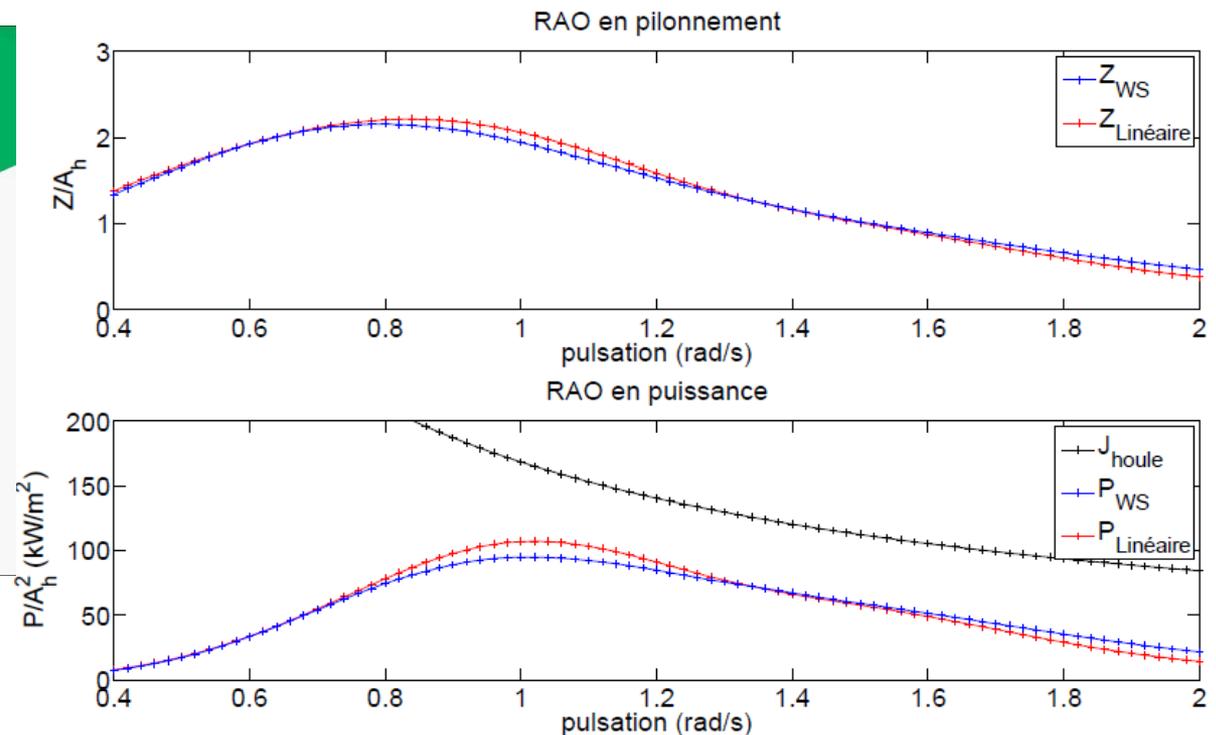
Etude de l'effet des mouvement de grande amplitude sur la performance d'un houlomoteur de type bouée pilonnante immergée



Balayage en fréquence :  $A_h = 0.85m \rightarrow 2.5\% < kA_h < 31\%$

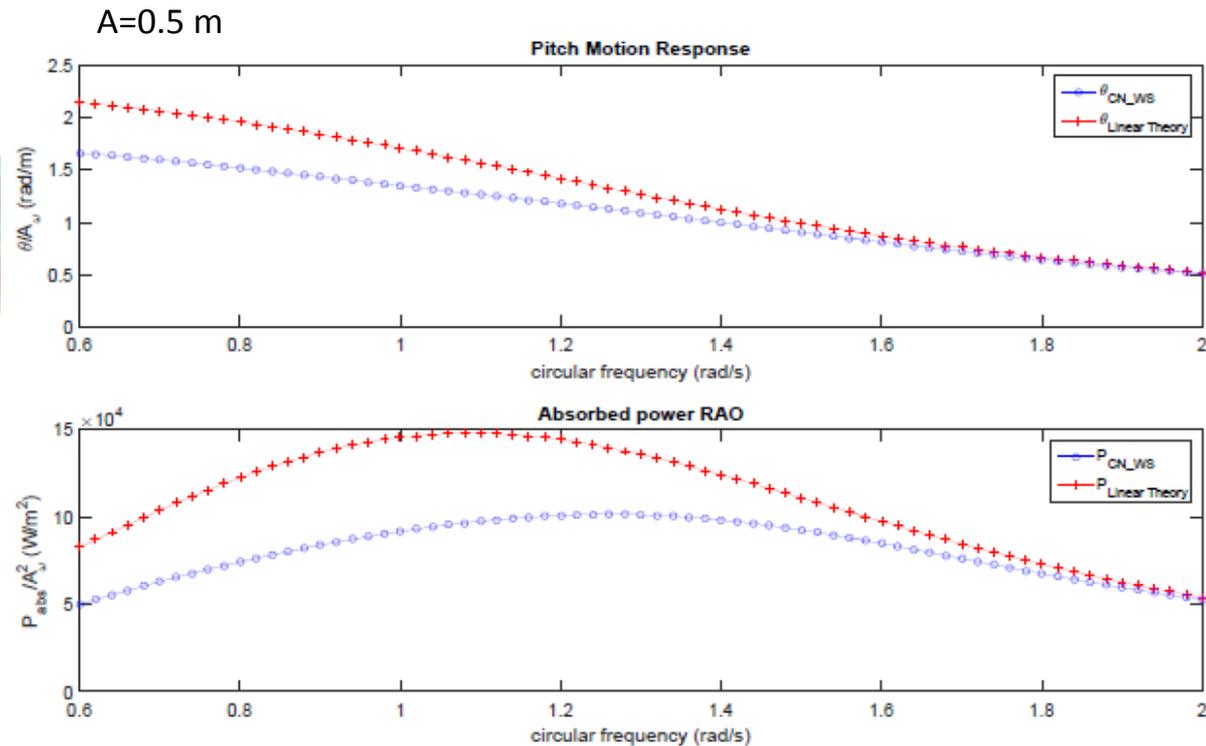
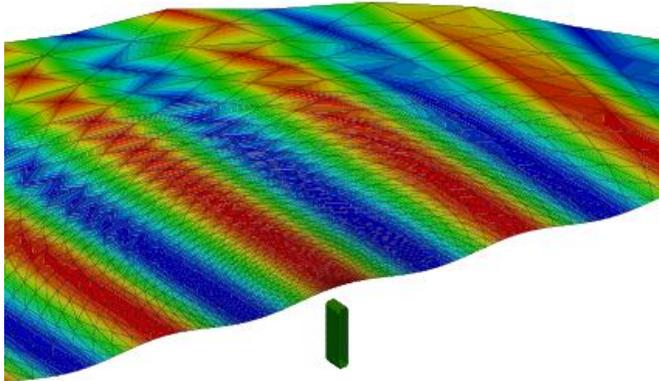
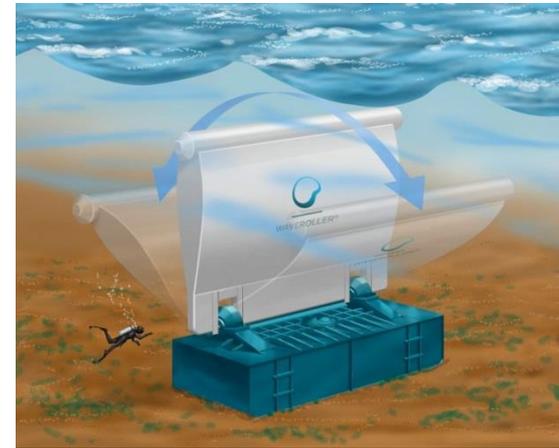


L. Letournel, C. Chauvigné, B. Gelly, A. Babarit, G. Ducrozet, P. Ferrant. Weakly nonlinear modeling of submerged wave energy converters. In revision



# WS\_ECN : Applications

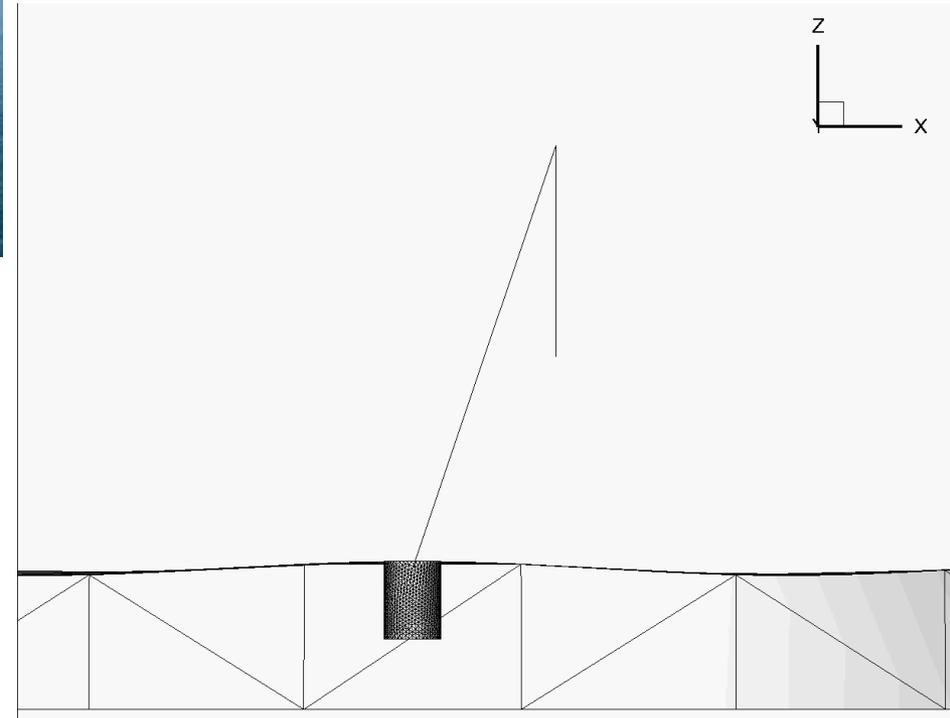
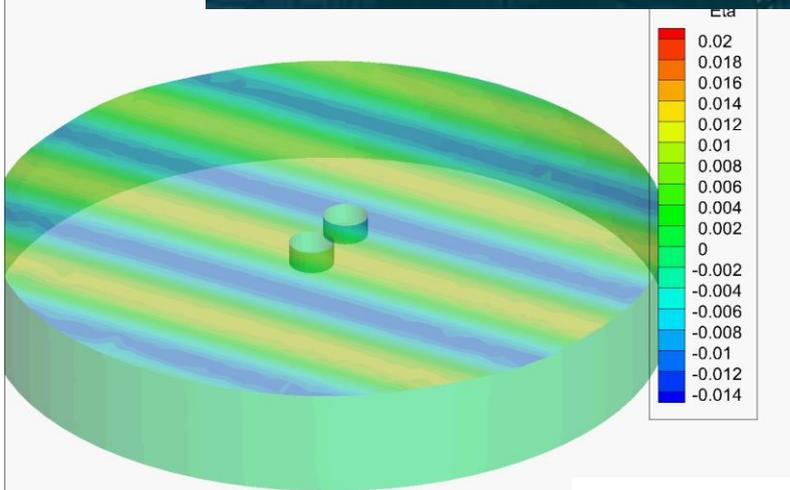
Etude de l'effet des mouvement de grande amplitude sur la performance d'un houlomoteur de type batteur immergé



L. Letournel, C. Chauvigné, B. Gelly, A. Babarit, G. Ducrozet, P. Ferrant. Weakly nonlinear modeling of submerged wave energy converters. In revision

# WS\_ECN : Applications

## Opérations marines



*P-Y. Wuillaume, A. Babarit, F. Rongère, M. Lynch, A. Combourieu, M. Philippe, P. Ferrant (2018). Comparison between experiments and a multibody weakly nonlinear potential flow approach for the ballasting of a SPAR. In Proc. Of the OMAE2018 conference, Madrid, Spain*

# WS\_ECN : Perspectives

## Développements

Temps CPU / temps physique  $\sim 10^{2-3}$  → accélération (parallélisation et/ou portage GPU)

Vitesse d'avance/courant

Entrées / sorties d'eau

Réalité virtuelle et réalité augmentée

Industrialisation : gestion des maillages et lecture de CAOs, visualisation des résultats, post-traitement et documentation

# Conclusions

Solveurs potentiels pour les interactions vagues/structures au LHEEA

NEMOH → 1<sup>er</sup> ordre, open-source

XWAVE → fully nonlinear

WS\_ECN → weak scatterer

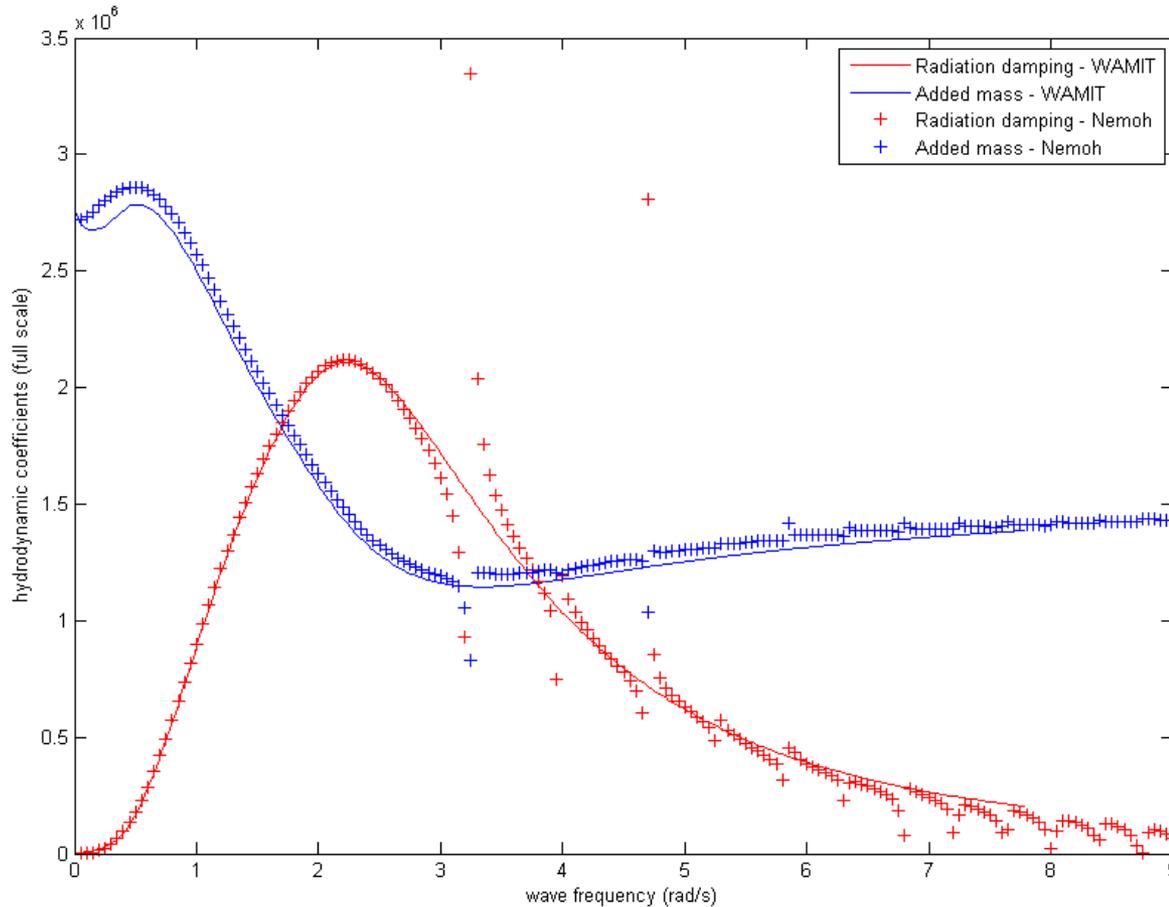
Couplage avec un algorithme multi-corps pour la simulation des systèmes EMRs

Articulated body algorithms (INWAVE, FRYDOM)

Merci pour votre attention !

Contact: [aurelien.babarit@ec-nantes.fr](mailto:aurelien.babarit@ec-nantes.fr)

# NEMOH: Vérification & Validation



Coefficients hydrodynamiques de radiation pour un absorbeur du système houlomoteur Wavestar

Calculs WAMIT par Morten Kramer (AAU,DK)