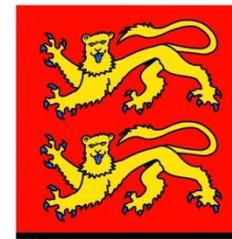


Modélisation numérique et physique de la chaîne de récupération de l'énergie de la houle par un dispositif bord à quai

Sixtine NEUVEGLISE, Doctorante
François MARIN, Directeur de thèse
Hassan SMAOUI, Co-directeur
Gaële PERRET, Co-encadrante
Philippe SERGENT, Resp. Scientifique



LABORATOIRE ONDES
et MILIEUX COMPLEXES



RÉGION NORMANDIE



Plan

- I. Présentation du projet
- II. Modèle linéaire du système hydrodynamique
- III. Modèle physique et essais en canal
- IV. Modèle numérique du convertisseur électrique
- V. Conclusion et perspectives

I. Présentation du projet

❖ Objectif

- Modéliser la chaîne de récupération de l'énergie de la houle par un dispositif bord à quai

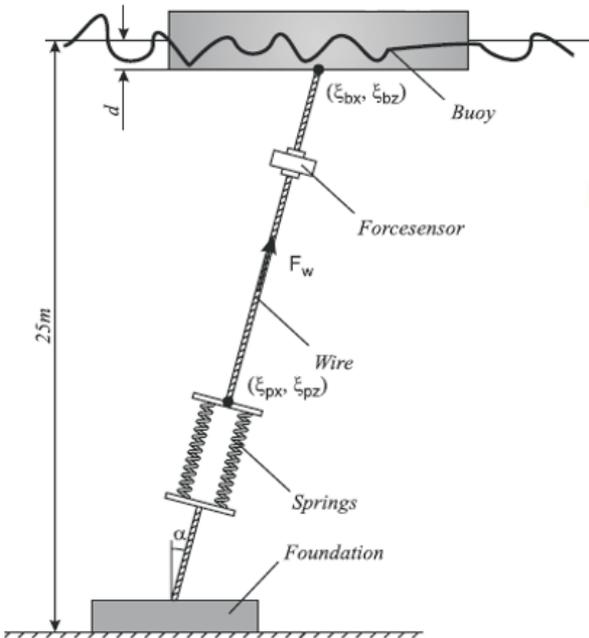
❖ Méthodologie

- Modélisation physique et numérique
- Comparer les modèles physiques et numériques du système
- Étudier l'impact sur les franchissements de digue

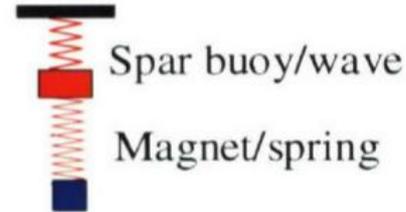


Site d'étude : port d'Esquibien (Bretagne)

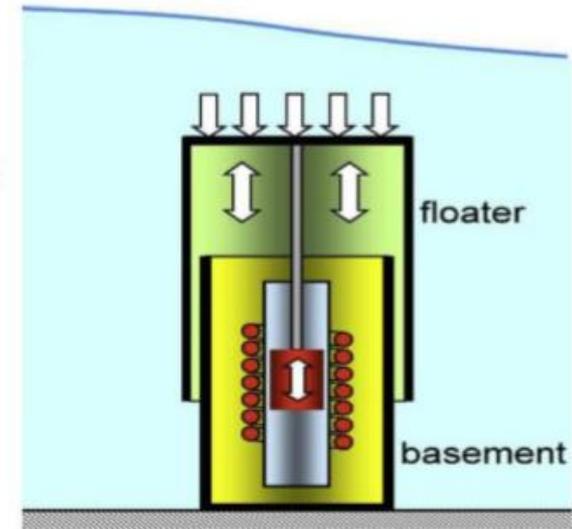
I. Etat de l'art



[M. ERIKSSON, 2007]



[J. T. CHEUNG, April 2007]



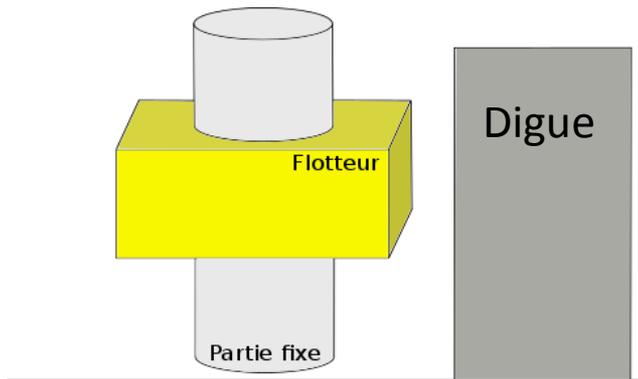
[Y. GAO, S. SHAO, 2015]

❖ Apports innovants du projet :

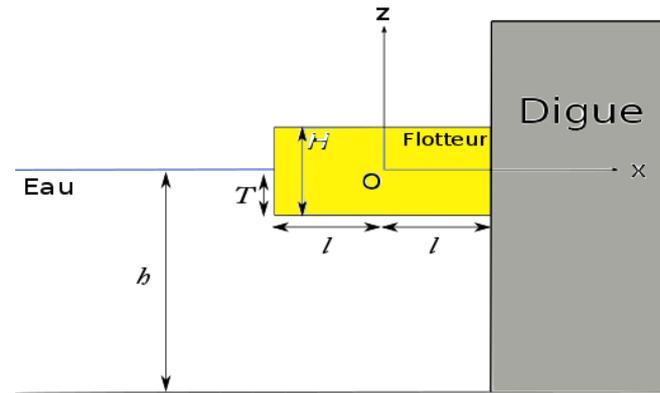
- Système bord à quai : récupération d'énergie et impact sur le franchissement
- Peu coûteux
- Simplicité

I. Présentation du projet

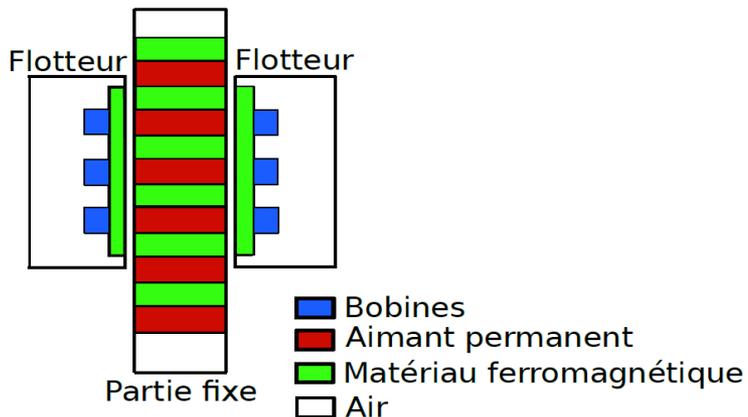
1. Définir le système bord à quai



2. Optimiser les dimensions du flotteur

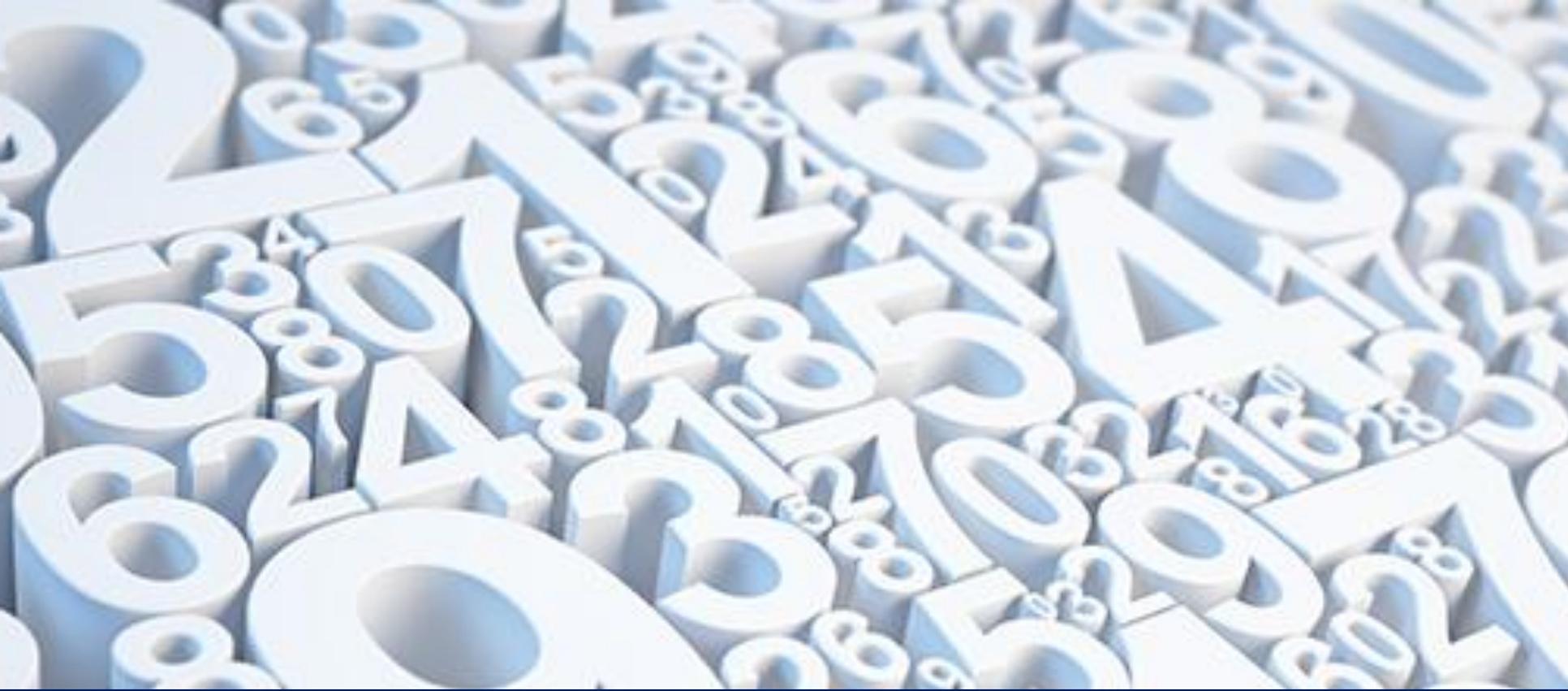


3. Réaliser le convertisseur d'énergie



4. Optimiser l'ensemble du système et réaliser les études préliminaires

- Comparaison Modélisation/Mesures
- Etude de rendements
- Etude de l'impact sur les franchissements



II. Modélisation linéaire du système hydrodynamique



II. Formulation analytique du problème

❖ Formulation des potentiels de houle

$$p = \rho g Z - \rho \frac{\partial \Phi}{\partial t}$$

$$P + \Pi = K_{Ar} z(t)$$

$$F_{EX} = -\rho_o \int_S \frac{\partial(\Phi_I + \Phi_D)}{\partial t} d\vec{S}$$

$$F_R = -\rho_o \int_S \frac{\partial \Phi_R}{\partial t} d\vec{S}$$

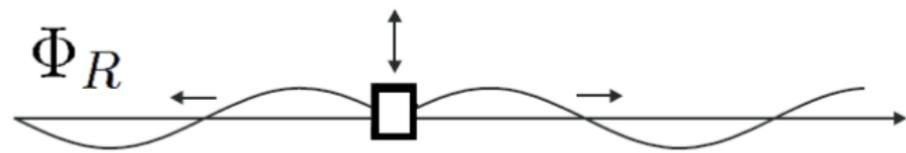
$$F_{EX} = \int_{-\infty}^{\infty} (K_F(\tau - t) + K_D(\tau - t)) \cdot z_e(t) dt$$

$$F_R = - \int_{-\infty}^{\infty} C_M(\tau - t) \cdot \ddot{z}(t) dt - \int_{-\infty}^{\infty} C_A(\tau - t) \cdot \dot{z}(t) dt$$

$$\Phi = \Phi_I + \Phi_D + \Phi_R$$



(a)



(b)



(c)

II. Résolution analytique puis numérique

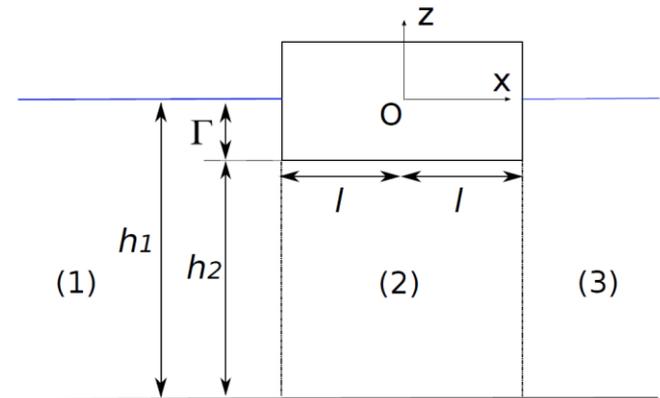
❖ Résolution analytique

- Conditions aux limites
- Relation de continuité en pression et en vitesse
- Ecriture des potentiels sous forme de sommes infinies
- Résolution d'un système matriciel

$$\phi_{D1} = \sum_{n=1}^{\infty} A'_{1n} \cos(\lambda_n(z + h_1 + \Gamma - H/2)) e^{-\lambda_n(x-l)}$$

$$\varphi_{R1} = \sum_{n=1}^{\infty} A_{1n} \cos(\lambda_n(z + h_1 + \Gamma - H/2)) e^{-\lambda_n(x-l)}$$

[Y.H. ZHENG, 2004, Ocean Engineering]



$$\begin{cases} SX_R = G^R \\ SX_D = G^D \end{cases}$$

❖ Expression de l'équation différentielle

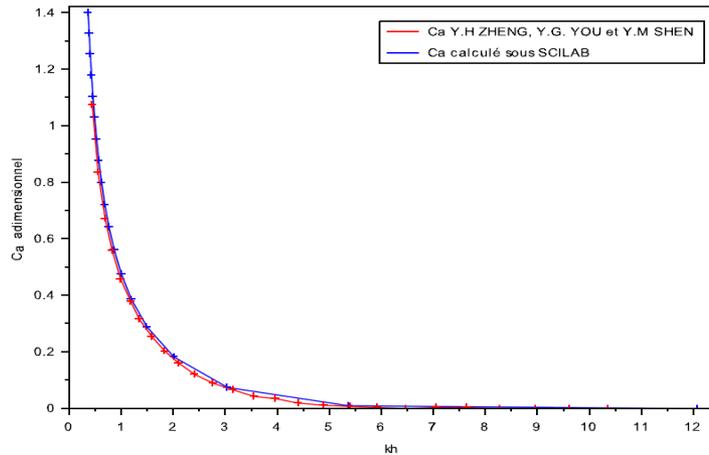
$$(m + C_M(\omega))\ddot{z} + C_A(\omega)\dot{z} + K_{Ar}z = F_{ex}(\omega)\sin(\omega t)$$

II. Résolution numérique

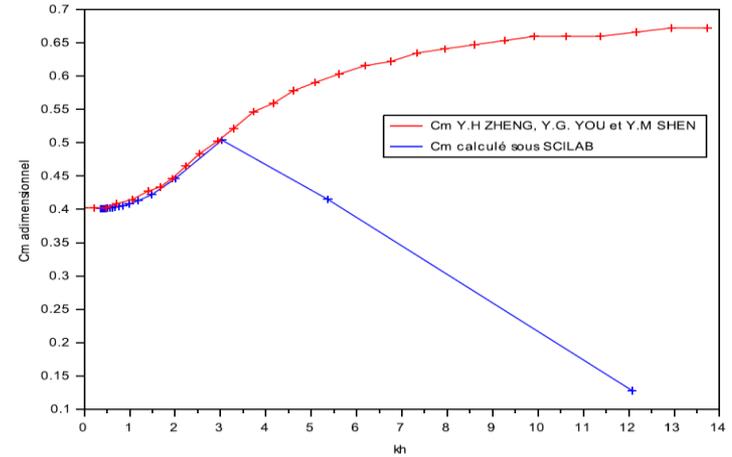
- Résolution des coefficients par GMRES (sous SCILAB)

[Y.H. ZHENG, 2004, Ocean Engineering]

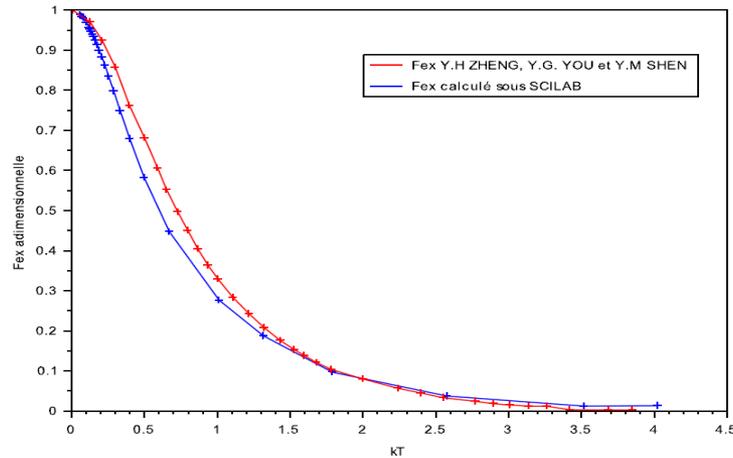
Amortissement Ca



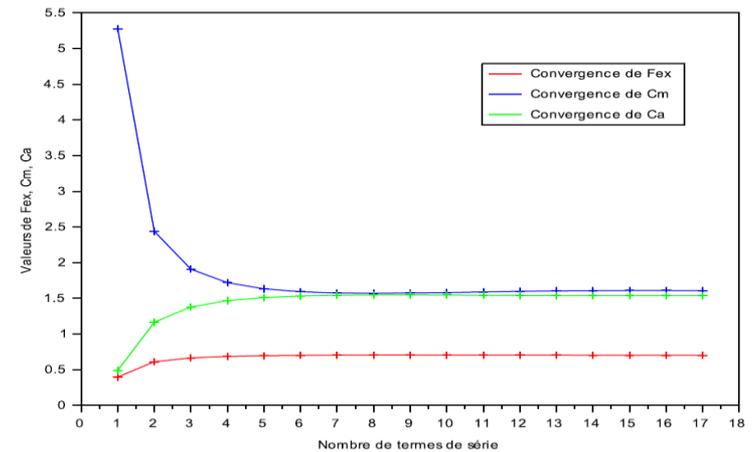
Masse ajoutée Cm

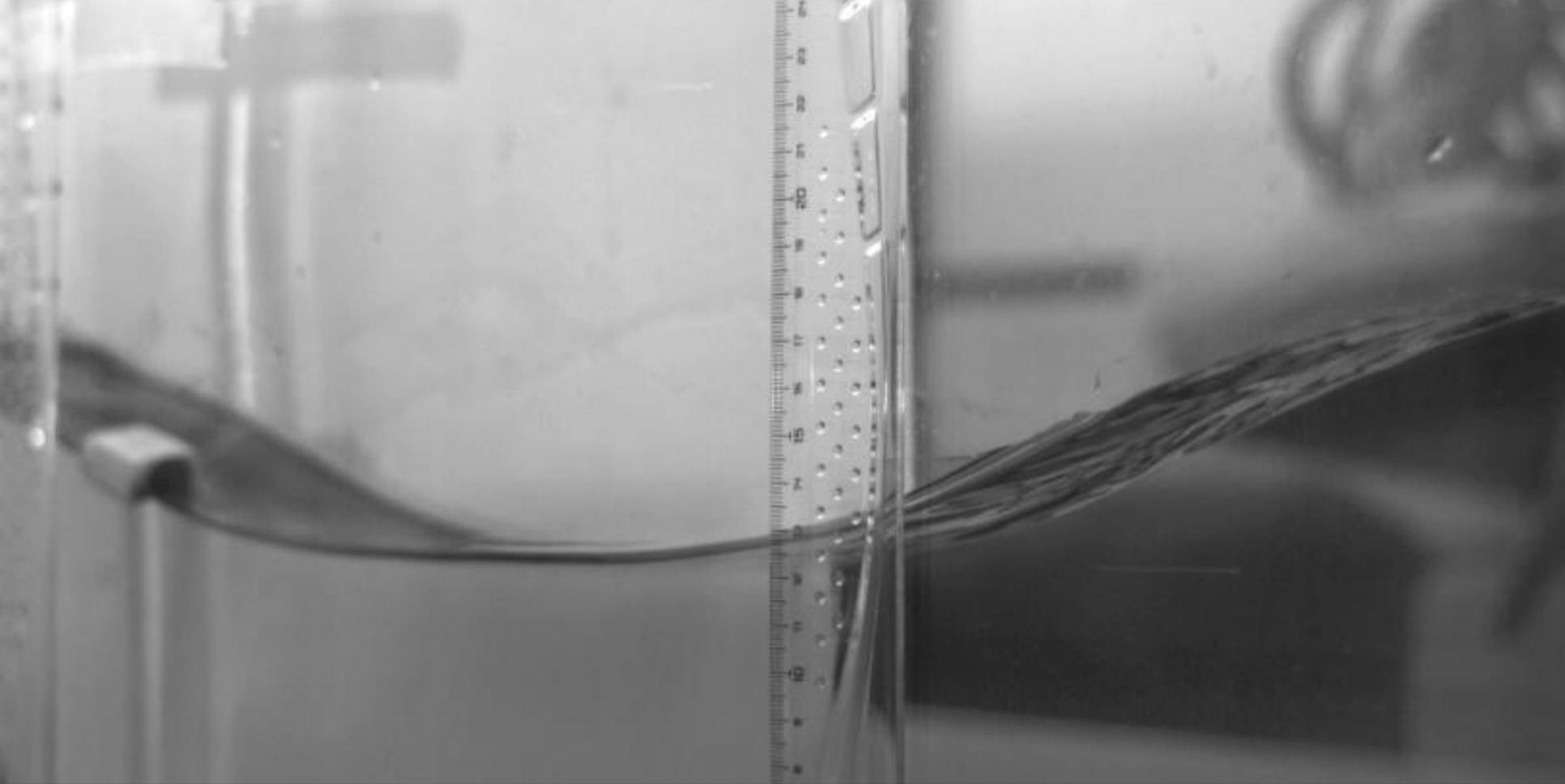


Forces extérieures Fex



Convergence





III. Modèle physique et essais en canal



III. Conditions des essais

❖ Conditions des essais (à échelle réelle)

- Canal de l'UTC (échelle 1:20)

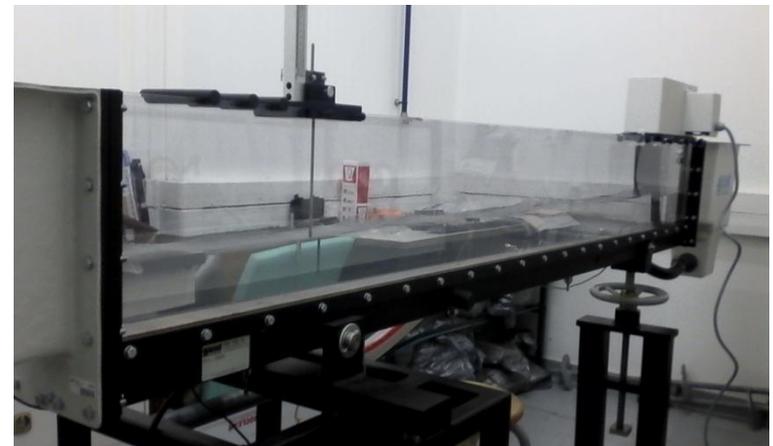
1:20	Profondeur (m)	Hauteur de houle (m)	Période (s)
Test 1	3	0.7	5.8
Test 2	3	1.6	4.2

- Canal du LOMC (échelle 1:15)

1:15	Profondeur (m)	Hauteur de houle (m)	Période (s)
MIN	3	0.5	2.5
MAX	9	1.75	6.5



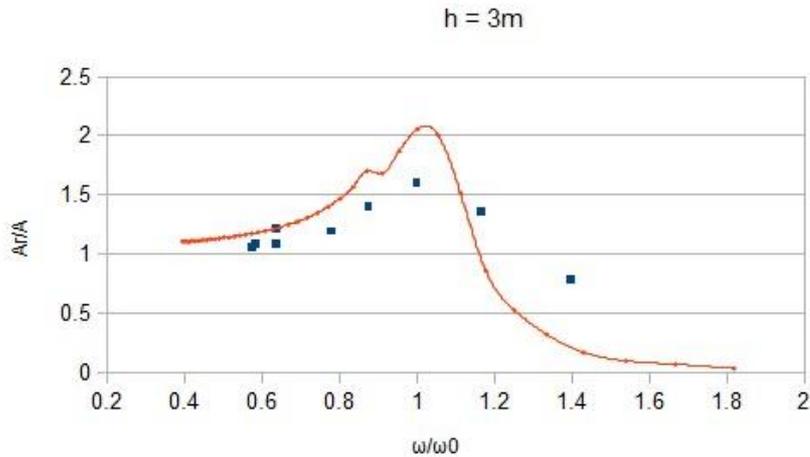
Maquette du LOMC



Canal de l'UTC utilisé pour les tests préliminaires

III. Résultats à faible tirant d'eau

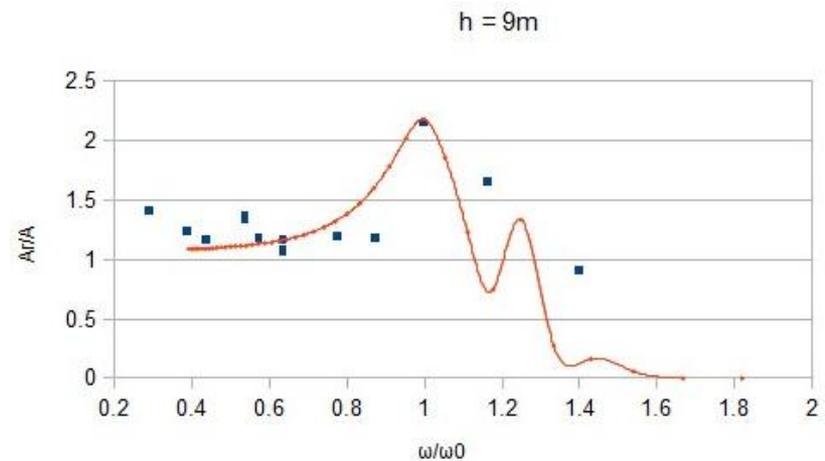
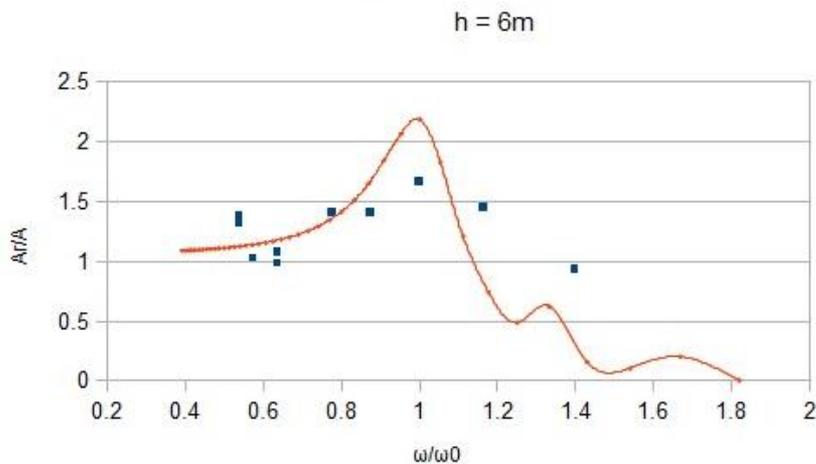
❖ Comparaison entre simulation et mesures expérimentales



- Diagramme de Bode en gain pour les différentes mesures effectuées
- On fait varier la profondeur h , ainsi que l'amplitude de houle A

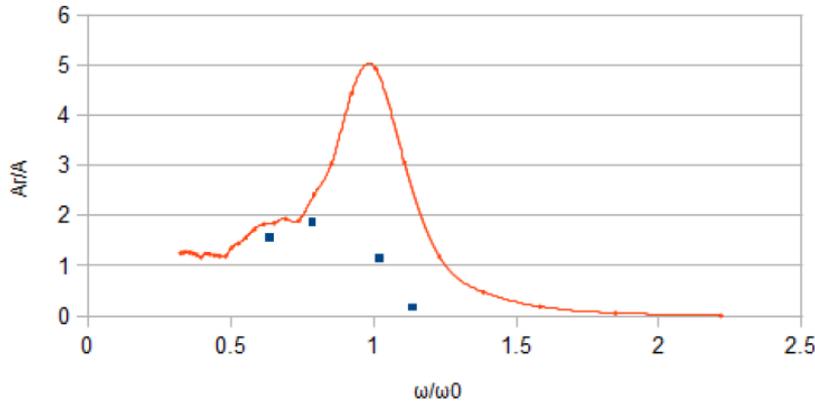
- Tirant d'eau du flotteur de 5cm

—◆— théorie
■ mesure

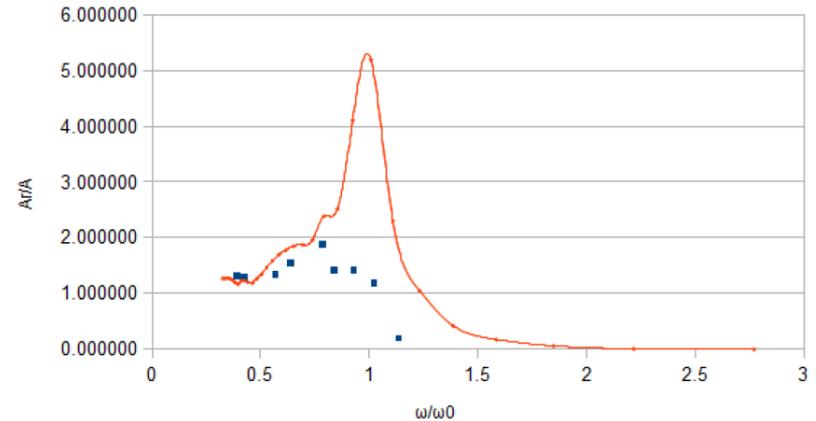


III. Résultats à fort tirant d'eau

Flotteur 2 à h = 7.5m



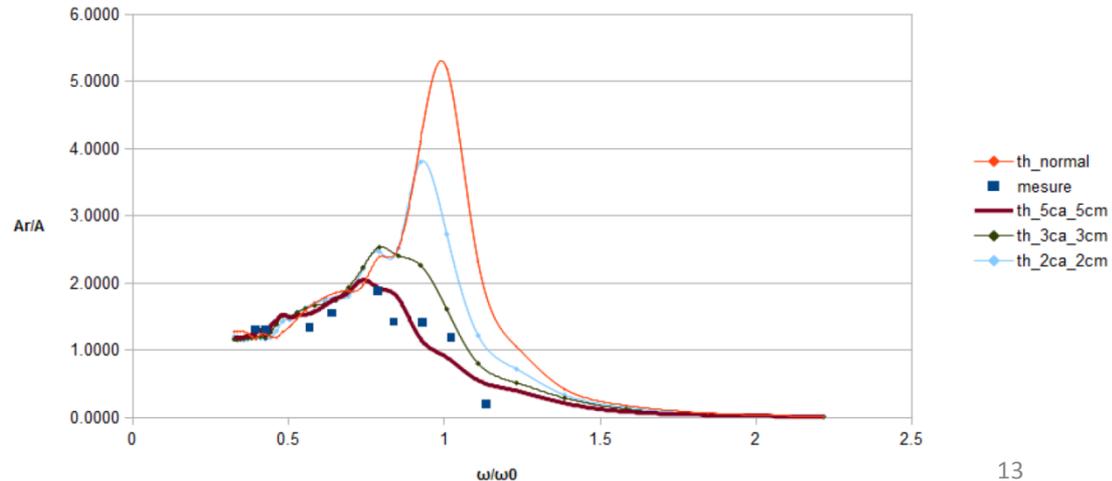
Flotteur 2 à h = 9m



- Tirant d'eau du flotteur : 25cm
- Les coefficients hydrodynamiques du modèle linéaire ne sont plus valables.
- Correction de la force de radiation telle que :

$$F_r = i\omega C_m u + C_a v$$

Impact des coefficients de radiation

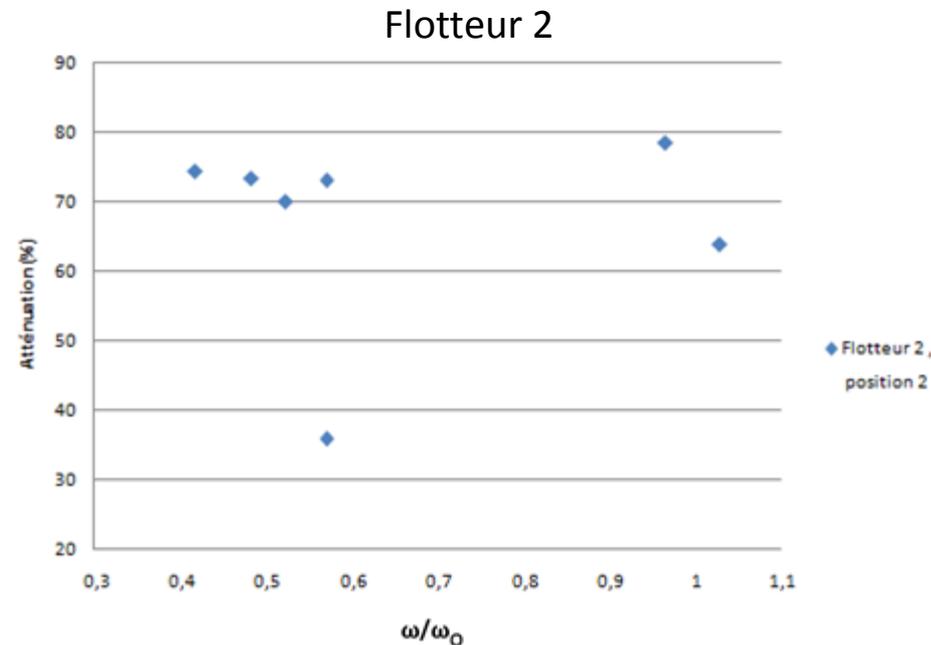
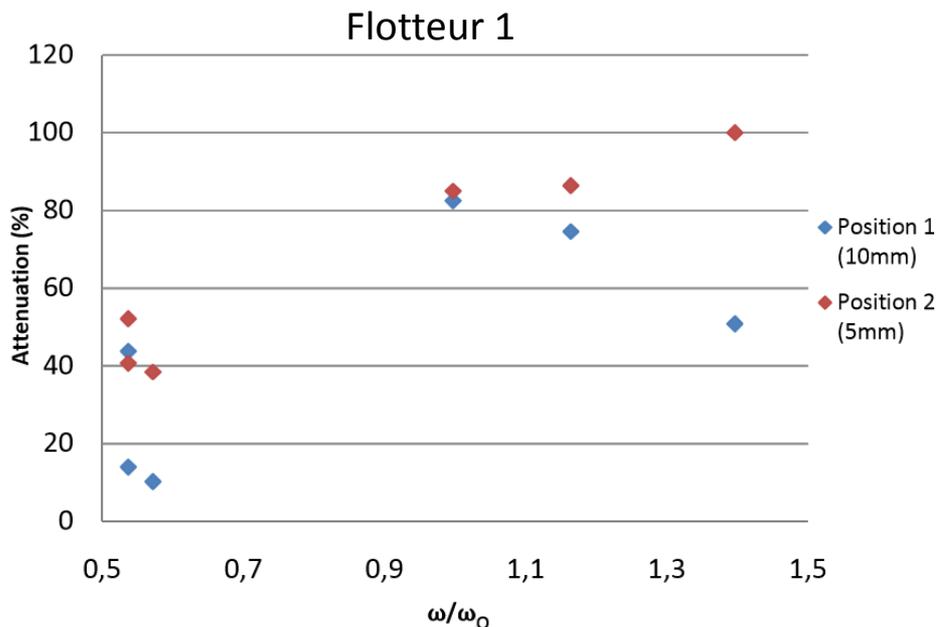


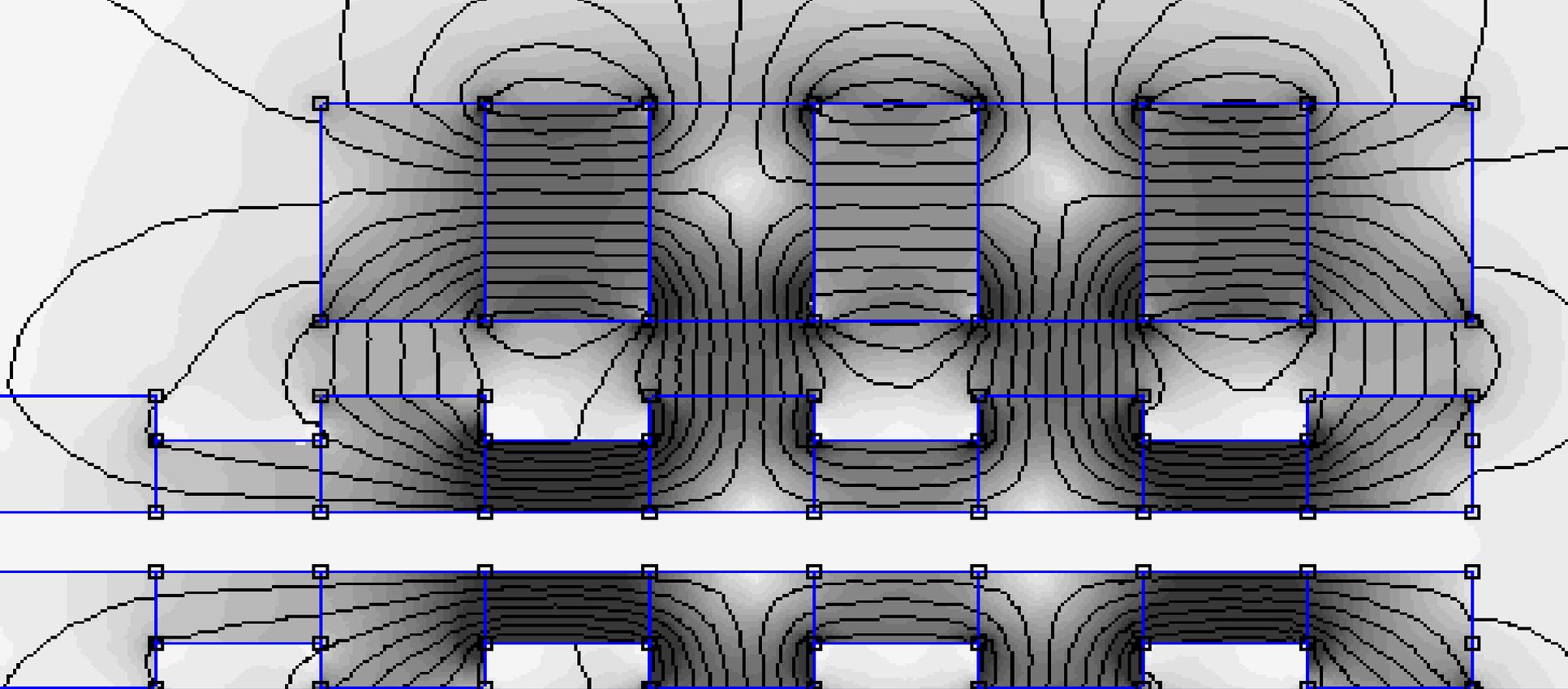
III. Impact du flotteur sur les franchissements

❖ Impact des différents flotteurs, selon différentes conditions de houle :

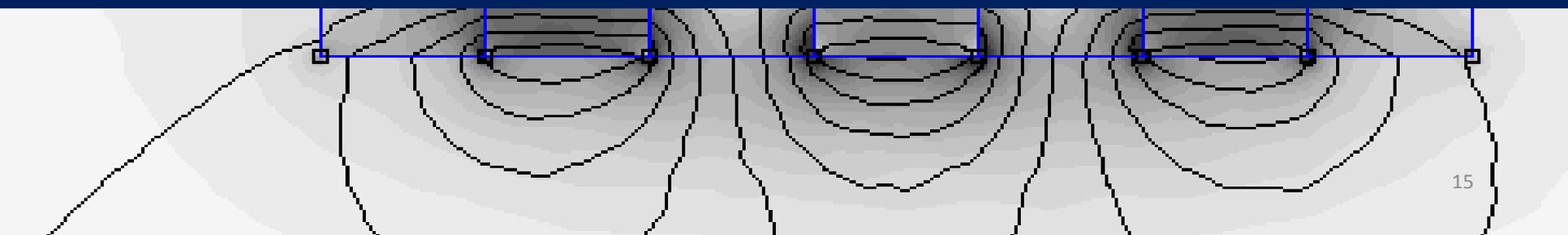
	Flotteur 1	Flotteur 2
Hauteur totale	3m	6m
Tirant d'eau	0.75m	3.75m

Position 1 : 1.5cm entre la digue et le flotteur
Position 2 : 7.5cm entre la digue et le flotteur





IV. Modélisation numérique du convertisseur électrique



IV. Calcul du coefficient de PTO optimal

❖ Objectifs

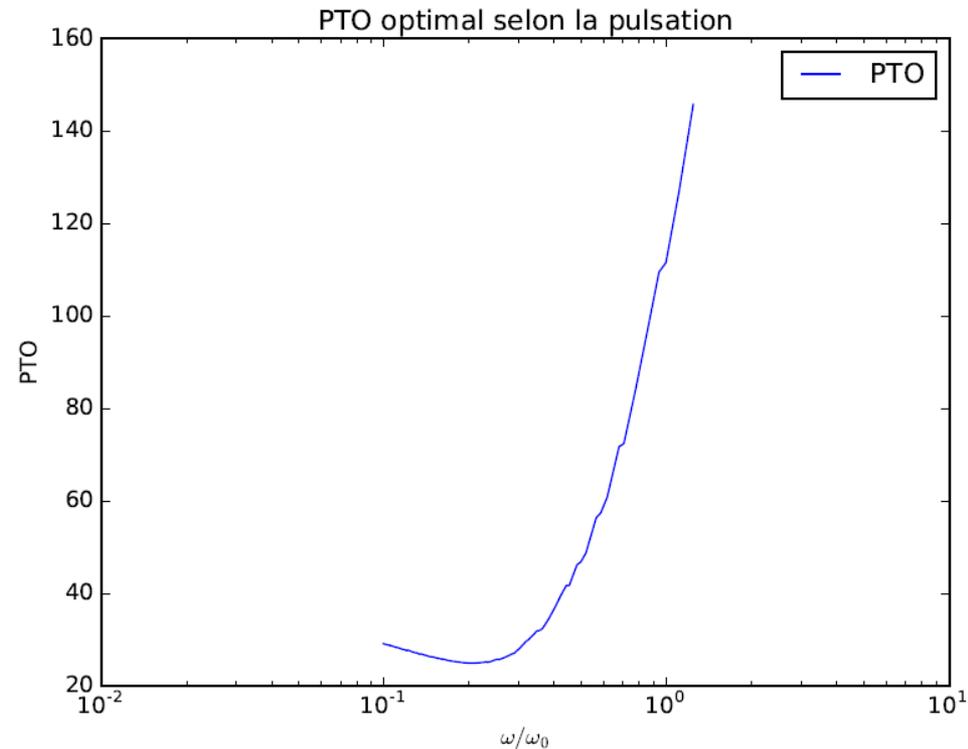
- Connaître l'impact du générateur sur les mouvements du flotteur

$$F_p = -C_p V(t)$$

$$P_{abs}^- = \frac{1}{2} \frac{C_p |F_{ex} + F_{\mu}|^2}{|Z + C_p|^2}$$

$$C_p(\omega) = \sqrt{(C_A)^2 + ((m + C_M)\omega - K_{ar}/\omega)^2}$$

[Développement et validation expérimentale de stratégies de contrôle des récupérateurs de l'énergie des vagues, Thèse R. GENEST]



IV. Résolution logicielle sous FEMM

❖ Equations générales

- Equations de Maxwell et calcul du flux :

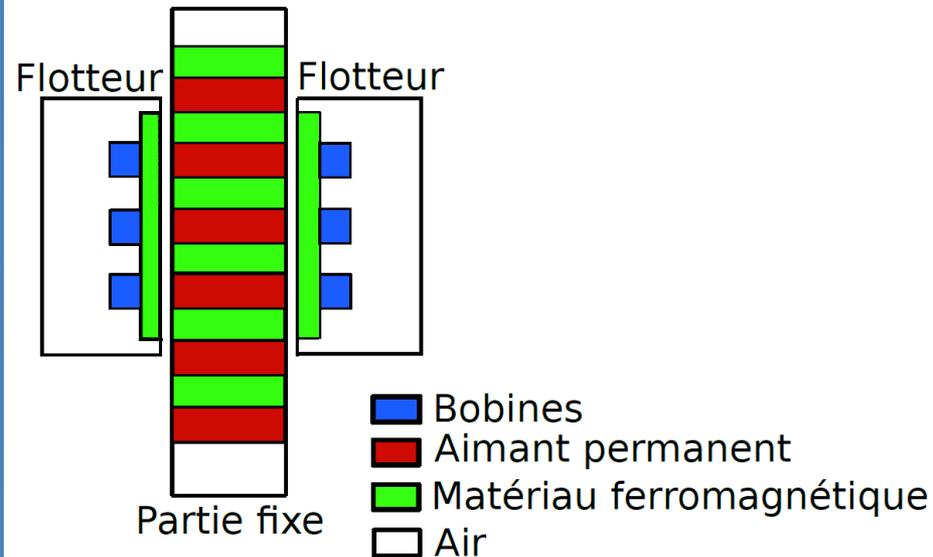
$$\left\{ \begin{array}{l} \text{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \\ \text{rot} \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \\ \text{div} \vec{D} = \rho \\ \text{div} \vec{B} = 0 \end{array} \right. \quad \Phi = N \int \vec{B} dS$$

- Equations de charge :

$$\left\{ \begin{array}{l} e(t) = -\frac{\partial \Phi}{\partial t} \\ e(t) = Ri(t) + R_{Load}i(t) + L \frac{\partial i}{\partial t} \end{array} \right.$$

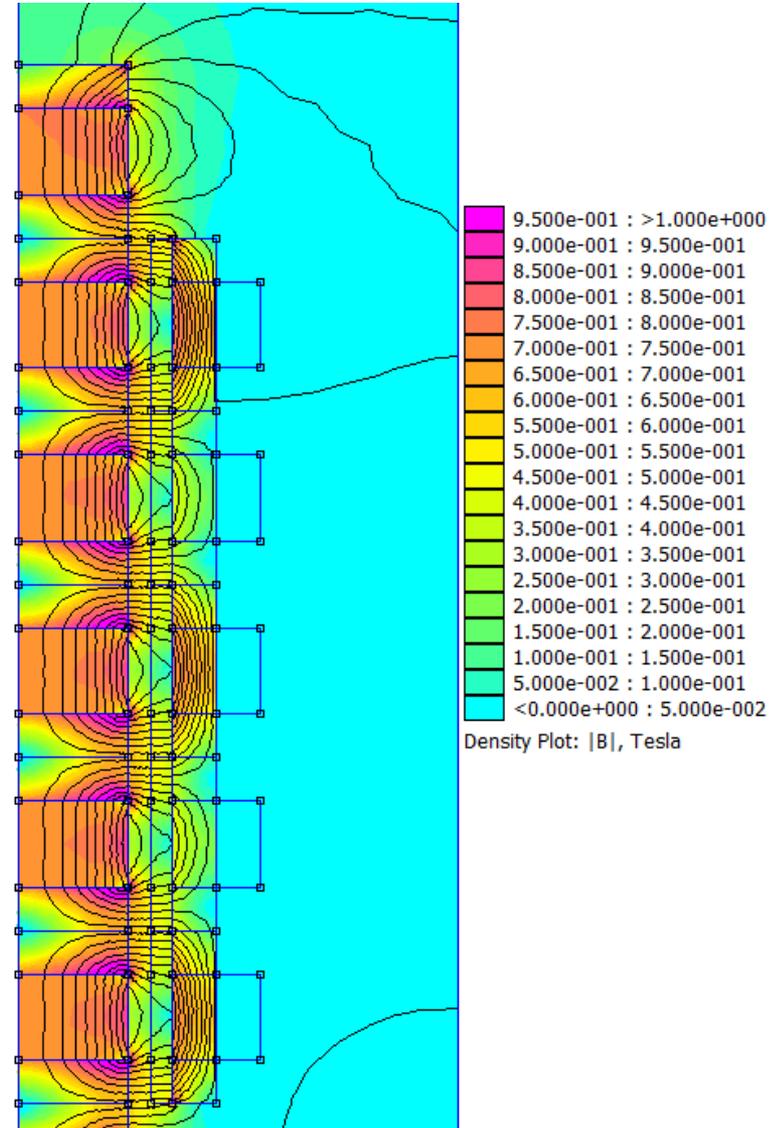
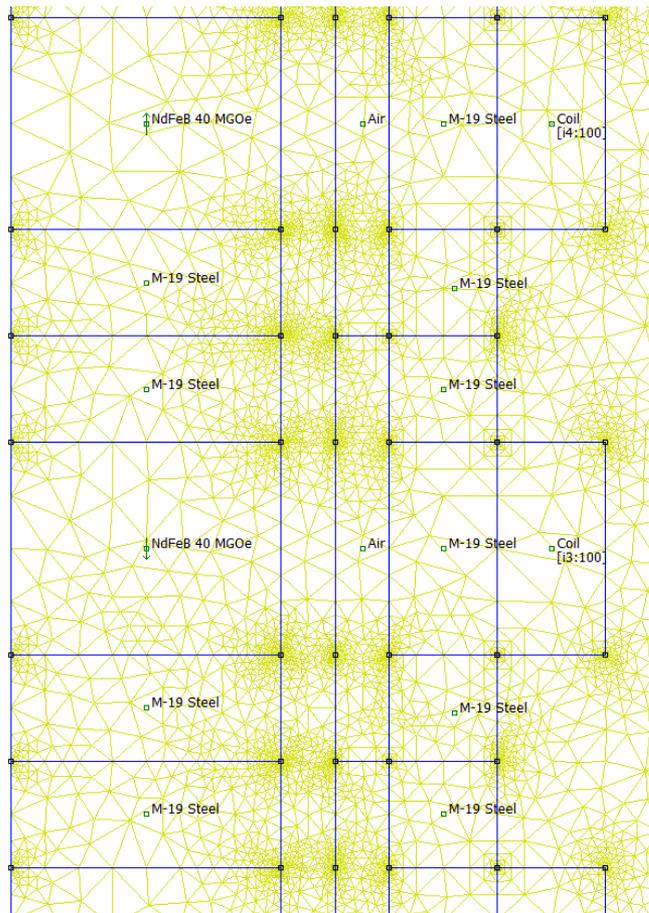
❖ Contraintes imposées par le flotteur

- Poids total
- Taille des éléments
- Puissance (PTO optimal)
- Vitesse du flotteur



IV. Résolution logicielle

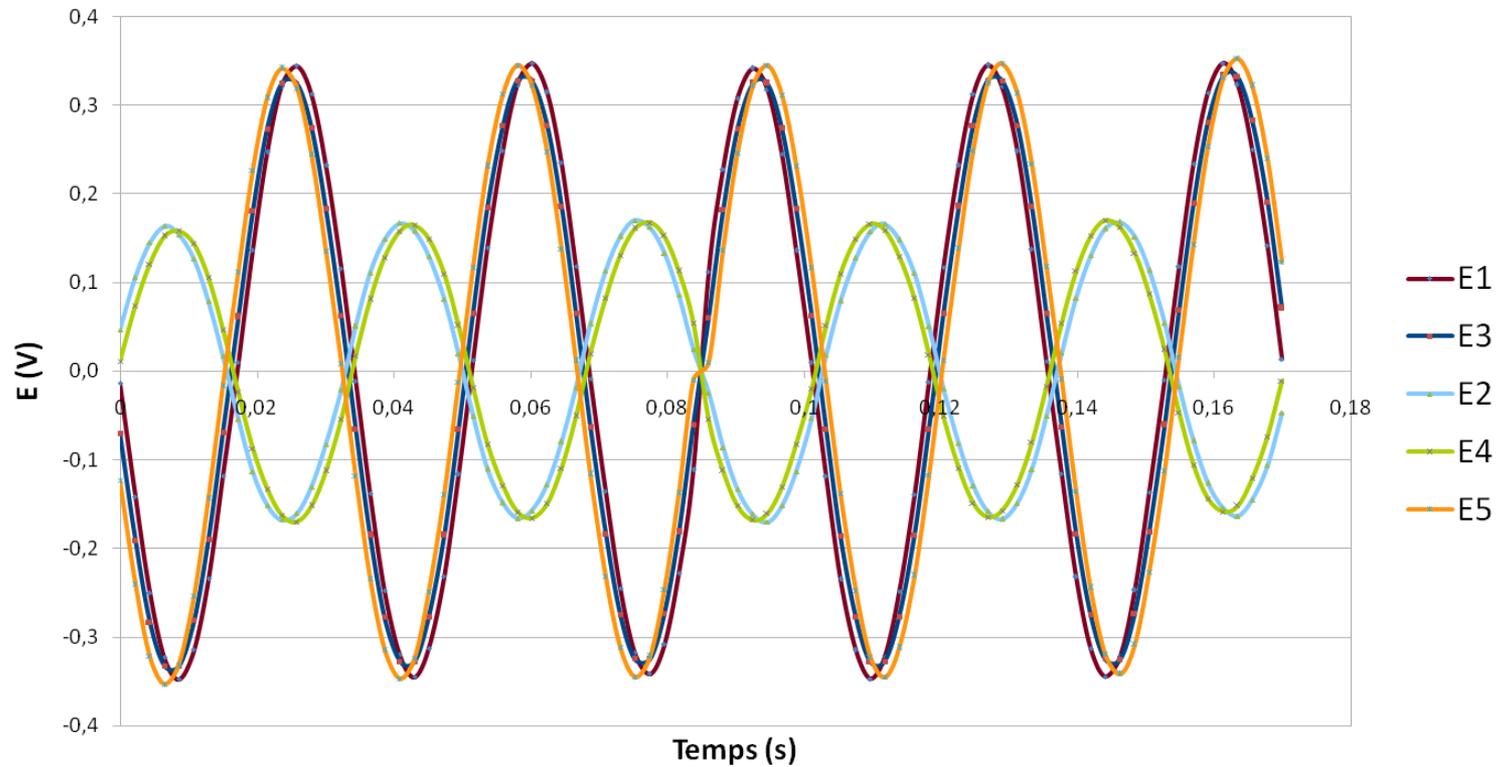
❖ Construction du modèle et résolution sous FEMM



IV. Résolution logicielle

❖ Résultats en tension et courants

Tensions théoriques des bobines



- Tension totale de 1.5V

IV. Résolution analytique

❖ Objectif

Résoudre de manière analytique le dimensionnement du flotteur et du générateur en un bloc

❖ Méthodologie

Résolution des équations de Maxwell par l'utilisation de sommes infinies

$$\mathbf{B} = \begin{cases} \mu_0 \mathbf{H}, & \text{dans l'air et les enroulements} \\ \mu_0 \mu_r \mathbf{H} + \mu_0 \mathbf{M}, & \text{dans les aimants} \end{cases}$$

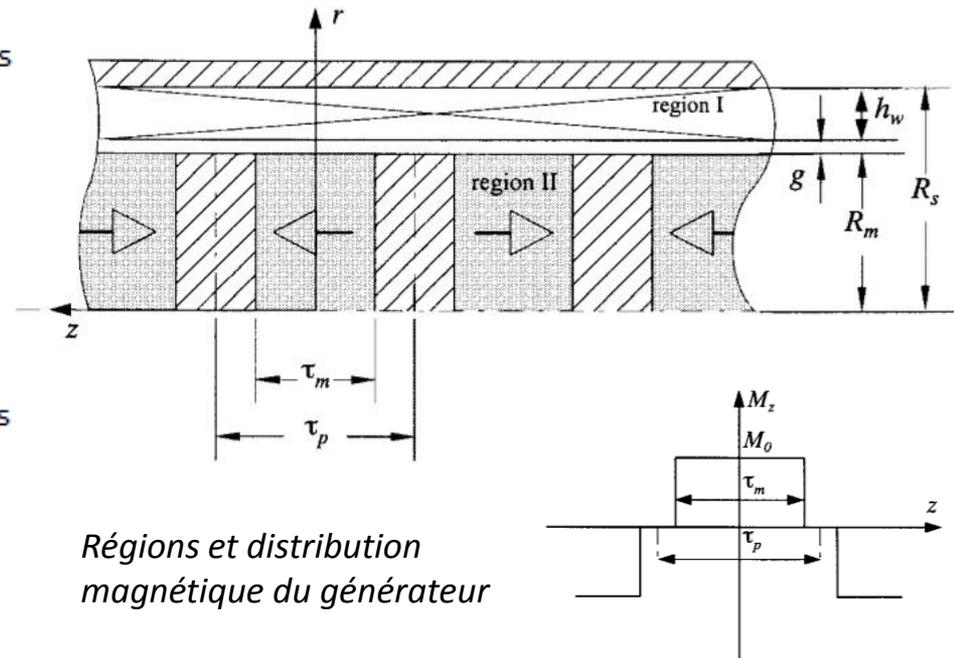
On pose \mathbf{A} tel que :

$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A}$$

$$\begin{cases} \nabla^2 \mathbf{A}_I = 0, & \text{dans l'air et les enroulements} \\ \nabla^2 \mathbf{A}_{II} = -\mu_0 \nabla \times \mathbf{M}, & \text{dans les aimants} \end{cases}$$

Avec \mathbf{A} , \mathbf{B} et \mathbf{M} des sommes infinies...

[J.WANG, W. JEWELL, D. HOWE, 1999, IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, VOL 35]



Régions et distribution magnétique du générateur

Conclusion

- Partie hydrodynamique :
 - Modélisation linéaire fiable dans les cas de faibles tirants d'eau
 - Pour les plus hauts tirants d'eau, il est possible de linéariser les forces de radiation
 - Le design du système permet une atténuation des franchissements de digue
- Partie électromécanique :
 - Le design du générateur a été défini

Perspectives

- Partie hydrodynamique :
 - Réaliser un modèle numérique avec effets non-linéaires (FLUENT 2D)
 - Comment approcher la résonance en faibles profondeurs ?
- Partie électromécanique :
 - Réaliser une maquette physique du convertisseur
 - Réaliser des tests expérimentaux
- Sur l'ensemble du système de production d'énergie :
 - Tester le système en canal
 - Etudier les rendements
 - Etudier les franchissements de digue

Merci de votre attention