

# Recalage de Modèle avec Interactions Fluides-Structures par Erreur en Relation de Comportement Modifiée - Application à l'Éolien Offshore

A. Roussel<sup>1,2</sup>, M.Capaldo<sup>2</sup>, L. Chamoin<sup>1,3</sup>, J.-P. Argaud<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire de Mécanique de Paris-Saclay, ENS Paris-Saclay, {antoine.roussel,ludovic.chamoin}@ens-paris-saclay.fr

<sup>2</sup> EDF R&D, {matteo.capaldo,jean-philippe.argaud}@edf.fr

<sup>3</sup> Institut Universitaire de France (IUF)

**Résumé** — Les modèles multi-physiques de l'éolien offshore souffrent de l'utilisation de nombreux paramètres incertains pendant que l'accès à des jeux de données d'opérations toujours plus importants se démocratise. Grâce à l'introduction de plusieurs a priori physiques et à l'évaluation de la fiabilité des équations de modèle concernées, le concept d'Erreur en Relation de Comportement Modifiée permet de régulariser leur calibration en présence de données bruitées et de lois de comportement multi-physiques. Des indicateurs sont établis pour questionner la modélisation choisie par rapport à la qualité des données.

**Mots clés** — Calibration, Erreur en Relation de Comportement modifiée (ERCm), Mécanique des Structures, Interaction Fluides-Structures (IFS), Éolien Offshore, Science des données pour la Mécanique

## 1 Introduction

Les objectifs de réduction des émissions de gaz à effet de serre, d'augmentation des capacités de production des énergies renouvelables et d'amélioration de l'efficacité énergétique sont adoptés par l'Union Européenne et la France dans le cadre des plans à l'horizon 2030 et la programmation pluriannuelle de l'énergie. Le plan stratégique d'EDF (CAP2030), en accord avec ces objectifs, s'attache notamment à développer l'usage de l'éolien offshore.

Afin de contribuer à rendre l'éolien en mer compétitif, il est nécessaire de garantir et éventuellement d'étendre la tenue des structures qui sont installées en mer pour soutenir les turbines, en particulier les sous-structures (Fig. 1) qui font le lien entre l'ensemble turbine-tour et le fond marin.

Ces sous-structures perçoivent les effets de tous les chargements extérieurs, subissent des conditions environnementales plus rudes que la partie émergée (corrosion, colonisation marine, vagues, etc) et représentent en moyenne 20-30% du coût total des investissements d'une éolienne, fixe ou flottante.

La conception, le suivi de la durée de vie restante et l'éventuelle prolongation par réduction des marges de ces sous-structures peuvent être optimisés par une ré-actualisation et calibration des modèles numériques [3] (Fig. 2) qui souffrent de l'utilisation de nombreux paramètres incertains et empiriques (coefficients de traînée et d'inertie fluidiques, amortissement structural, raideur de sol).



FIGURE 1 – Composants d'une éolienne offshore

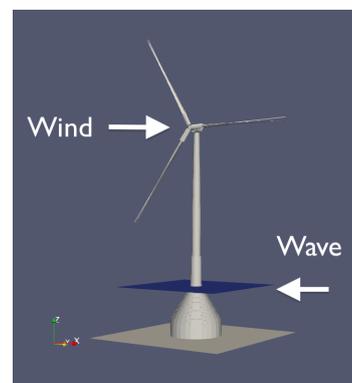


FIGURE 2 – Modèle associé (DIEGO)

Il s'agit d'une part de réduire l'erreur entre la structure modélisée en phase de conception et la structure réelle en fonctionnement, et d'autre part de diminuer les incertitudes sur les chargements extérieurs hydrodynamiques et aérodynamiques. Pour ce faire, le travail de recherche porte sur l'élaboration d'une méthode robuste pour l'assimilation des données à partir de modèles numériques et de données in situ. Celle-ci permet en outre :

- de comparer la précision des modèles au jeux de données disponibles,
- d'évaluer le choix et le positionnement des capteurs actuels et d'optimiser ceux des capteurs dans le futur.

En présence de différentes lois de comportement présentant des fiabilités et des niveaux de bruits différents, nous proposons de suivre le concept d'Erreur en Relation de Comportement Modifiée (ERCm). Celui-ci permet à partir d'un à priori physique de favoriser les informations jugées fiables (équations d'équilibre, position des capteurs, ...) en relaxant les informations incertaines (lois de comportement, valeurs mesurées, ...) en les prenant en compte avec des régularisations.

## 2 État de l'art et objectifs

De précédentes opérations d'assimilation de données dans un cadre IFS ont été précédées par minimisation d'une fonction coût formulée comme l'écart au sens de la norme  $L2$  entre modèle et données [2]. Cependant, la nécessité de recalibrer les lois de comportement de notre cas d'application avec des niveaux de fidélité différents amène à considérer le concept ERCm qui permet de renforcer la fonction coût par l'ajout de termes d'erreur issus d'équations non fiables relaxées. Cette structuration informée par la physique a pour but de classer les différentes contributions de l'erreur selon leurs origines (lois de comportement, valeurs mesurées). L'ERCm fut d'abord définie dans des problèmes de recalage en mécanique vibratoire [5] en relaxant des lois de comportement mécanique (inertie, élasticité) et la vérification des données :

$$E_{ERCm,\omega}^2 = E_{ERC|meca,\omega}^2 + \frac{\alpha}{2} \|\mathbf{u}_\omega - \mathbf{u}_{obs,\omega}\|_{L^2}^2 \quad (1)$$

L'ERCm s'est ainsi montrée efficace et relativement faible en coût de calcul à plusieurs reprises pour l'assimilation de données bruitées en dynamique des structures [7, 8]. Des extensions sur des lois de comportement non-structurelles, notamment en acoustique [6], existent et fonctionnent également. La formulation harmonique de l'ERCm est par conséquent indiquée dans les problèmes de recalage connu pour être gourmand en temps de calcul, mais peut en revanche paraître inadaptée aux non-linéarités des lois de comportement d'interaction fluides-structures impliquées dans la modélisation de l'éolien (Bernoulli, Morison).

À ceci s'ajoute la difficulté de disposer uniquement de données particulièrement bruitées, caractéristiques de l'environnement agressif offshore, qui va de pair avec l'accès contraignant au site et l'impossibilité de reproduire les conditions d'exploitation en laboratoire. Des méthodes sans a priori physique existent déjà pour rendre le processus d'assimilation systématique et simplifié dans le cas de systèmes industriels complexes, peu accessibles avec des seuils d'exigence élevés [1]. Cependant, à nouveau elles ne semblent pas correspondre aux besoins d'un recalage simultané de plusieurs lois de comportement avec des niveaux de fidélité différents.

Dans ce contexte, notre choix s'est porté vers une formulation vibratoire de l'ERCm rendue possible par une linéarisation des lois IFS de l'éolien. Cette définition s'appuie notamment sur l'extension de l'erreur de Drucker pour le recalage vibratoire [5] aux lois d'interaction fluides-structures linéarisées de Morison et de Bernoulli.

La régularisation par une loi de comportement structurelle de l'assimilation de données issues de physiques différentes s'est déjà montrée fructueuse [9]. L'originalité de la démarche de recherche réside dans la formulation d'erreurs supplémentaire de lois d'interactions fluide-structure hydrodynamique et aérodynamique peu fiable et également recalées ici. On introduit ainsi la formulation d'erreurs de comportement hydrodynamique et aérodynamique associées :

$$E_{ERCm,\omega}^2 = E_{ERC|meca,\omega}^2 + E_{ERC|aero,\omega}^2 + E_{ERC|hydro,\omega}^2 + \frac{\alpha}{2} \|\mathbf{u}_\omega - \mathbf{u}_{obs,\omega}\|_{L^2}^2 \quad (2)$$

### 3 Méthodologie

#### 3.1 Stratégie

Le cas d'étude est l'enrichissement du code de calcul éolien de EDF R&D DIEGO (Fig. 2) à partir de données synthétiques. Il s'agit d'un code multi-physiques par éléments finis de type poutre dédié à l'éolien offshore et ce dans de nombreux projets [4]. Par conséquent il couvre un nombre important de sous-structures, de physiques et de lois de comportement associés.

Le but est de préparer à exploiter autant que possible les données d'exploitations issues des sous-structures offshore de EDF. De plus, cette assimilation conditionne le modèle dans la mesure où son niveau de précision doit être en adéquation avec la quantité et qualité des données disponibles : il est important de pouvoir justifier que le modèle n'est ni trop précis (*overfitting*) ni trop relaxé (*oversmoothing*).

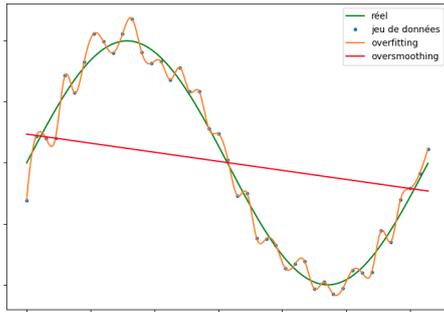


FIGURE 3 – Exemple d'interpolation présentant de l'overfitting et de l'oversmoothing

Un exemple d'interpolation d'un jeu de données bruité image d'une sinusoïde (Fig. 3) peut démontrer l'importance d'accorder le juste poids au modèle par rapport aux mesures. Accorder trop d'importance aux mesures (*overfitting*) peut faire apparaître des variations non physiques. En revanche, accorder trop d'importance au modèle (*oversmoothing*) peut lisser la réalité et ainsi cacher des phénomènes physiques. La stratégie d'assimilation par ERCm est fondée sur la sélection d'un juste équilibre entre le respect des équations physiques non fiables (notamment les lois de comportement) et le respect des données bruitées.

Pour illustrer cette hybridation, la méthodologie a été de mener une expérience jumelle en environnement contrôlé : une calibration a été réalisée à partir d'un design de sous-structure et d'un jeu de données synthétique image d'un cas de chargement simple (vent constant, houle de Airy d'ordre 1) et respectant le formalisme de précédentes campagnes de mesures. La stratégie a été de d'abord construire un Modèle Viable Minimum (MVM, Fig. 4) en retenant les modélisations de DIEGO associées au design choisi, pouvant être justifiées par l'exploitation du jeu de données et correspondant au besoin de la méthode de recalage. Ce modèle résout notamment en dynamique vibratoire linéaire. Ensuite, une paramétrisation des lois de comportement incertaines a été établie (Fig. 5) pour définir l'espace d'optimisation.

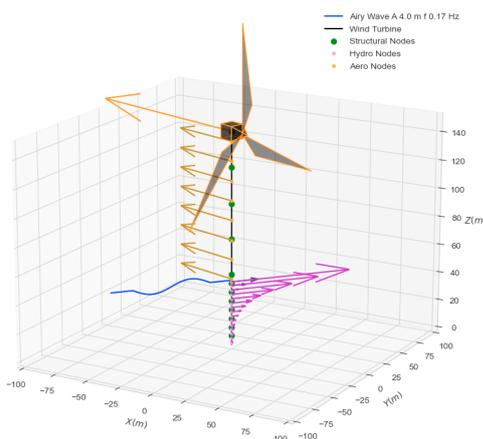


FIGURE 4 – Model Viable Minimum de DIEGO

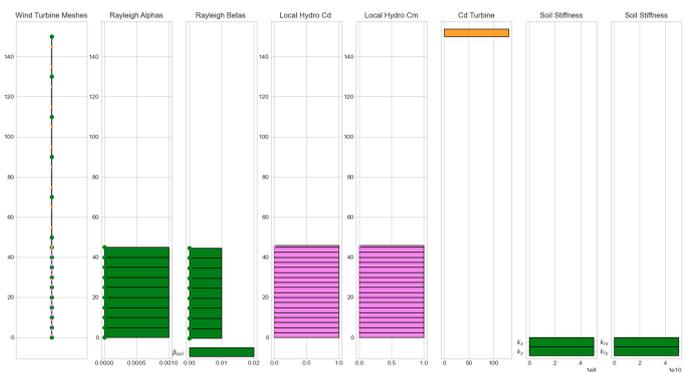


FIGURE 5 – Représentation d'un jeu de paramètres de contrôle

## 3.2 ERCm étendue aux interactions fluides-structures

### 3.2.1 Linéarisation du problème direct

Les sollicitations aérodynamiques (en jaune sur la Fig. 4) et hydrodynamiques (bleu/violet sur la Fig. 4) vues par une éolienne offshore sont modélisées par les lois de comportement empiriques de Bernoulli (noté  $\mathcal{A}$ ) et Morison (noté  $\mathcal{H}$ ) s'appliquant respectivement sur l'ensemble tour/turbine et sur la sous-structure :

$$\mathbf{f}_a = \frac{1}{2} \rho D c_{ad} \mathbf{v}_a |\mathbf{v}_a| = C_{ad} \mathbf{w}_a \quad (3)$$

$$\mathbf{f}_h = \frac{1}{2} \rho D c_{hd} \mathbf{v}_h |\mathbf{v}_h| + \rho S c_{hm} \dot{\mathbf{v}}_h = C_{hd} \mathbf{w}_h + C_{hm} \dot{\mathbf{v}}_h \quad (4)$$

où  $\mathbf{v}_a$  et  $\mathbf{v}_h$  les vitesses respectives du vent et de la mer,  $\mathbf{w}_x = \mathbf{v}_x |\mathbf{v}_x|$  appelée ici la *vitesse quadratique*,  $\rho$  est la masse volumique du fluide,  $D$  le diamètre de de l'éolienne,  $S$  sa section,  $c_{ad}$  le coefficient de traînée aérodynamique,  $c_{hd}$  le coefficient de traînée hydrodynamique,  $c_{hm}$  le coefficient de masse hydrodynamique. Ce sont ces derniers coefficients fluidiques qui sont mal connus dans ces lois et donc à recalculer. Des coefficients généralisés  $C_a$ ,  $C_{hd}$  et  $C_{hm}$  seront utilisés en suivant pour simplifier les notations.

Les deux champs de forces  $\mathbf{f}_a$  et  $\mathbf{f}_h$  dépendent de la cinématiques du vent  $\mathbf{v}_a$  et des vagues  $\mathbf{v}_h$  dont les descriptions sont jugées comme fiables. En première approximation dans le problème de recalage, le vent est assimilé à un vent constant et la cinématique de vague suit les équations de Airy d'ordre 1 :

$$\mathbf{v}_a = C^{te} = \mathbf{v}_{a0} \quad (5)$$

$$\mathbf{v}_h = g(z) \cos(\omega t) \quad (6)$$

Pour linéariser les forces hydrodynamiques, on décide de conservé les 5 premiers harmoniques de Fourier de la vitesse quadratique  $\mathbf{w}_h = \mathbf{v}_h |\mathbf{v}_h|$  :

$$\mathbf{w}_h = g(z) \cos(\omega t) |g(z) \cos(\omega t)| \approx g(z)^2 A_1 \cos(\omega t) + g(z)^2 A_3 \cos(3\omega t) = \mathbf{w}_{h1} + \mathbf{w}_{h3} \quad (7)$$

où  $A_1 = \frac{8}{3\pi} = 0.85$ ,  $A_3 = \frac{8}{15\pi} = 0.17$ ,  $A_{5+} < 0.025$

$$\mathbf{f}_h = C_{hd} \mathbf{w}_h + C_{hm} \dot{\mathbf{v}}_h = C_{hd} \mathbf{w}_{h1} + C_{hm} \dot{\mathbf{v}}_h + C_{hd} \mathbf{w}_{h3} \quad (8)$$

La formulation des efforts fluidiques totaux  $\mathbf{f}$  fait désormais intervenir 4 harmoniques notés  $\mathbf{w}_{a0}$ ,  $\mathbf{w}_{h1}$ ,  $\mathbf{v}_h$ ,  $\mathbf{w}_{h3}$  :

$$\mathbf{f} = \mathbf{f}_a + \mathbf{f}_h = C_{ad} \mathbf{w}_{a0} + C_{hd} \mathbf{w}_{h1} + C_{hm} \dot{\mathbf{v}}_h + C_{hd} \mathbf{w}_{h3} \quad (9)$$

Le problème direct élément finis d'inconnue  $\mathbf{U}$ , vecteur des déplacements nodaux structuraux, s'écrit alors :

$$\mathbb{M}\ddot{\mathbf{U}} + \mathbb{B}\dot{\mathbf{U}} + \mathbb{K}\mathbf{U} = \mathbf{F}_g + \mathbb{P}_a C_{ad} \mathbf{W}_{a0} + \mathbb{P}_h C_{hm} \dot{\mathbf{V}}_h + \mathbb{P}_h C_{hd} (\mathbf{W}_{h1} + \mathbf{W}_{h3}) \quad (10)$$

avec :

- $\mathbb{M} = \int_{\Omega} \rho \mathbb{N} \mathbb{N}$  la matrice de masse et  $\mathbb{N}$  la matrice des fonctions de forme,
- $\mathbb{B}$  la matrice d'amortissement de Rayleigh,
- $\mathbb{K}$  la matrice de raideur de Timoshenko,
- $\mathbf{F}_g$  le vecteur des forces dues à l'effet de la gravité sur l'éolienne,
- $\mathbb{P}_a$  la matrice de projection des efforts aérodynamiques sur le maillage structural,
- $\mathbb{P}_h$  la matrice de projection des efforts hydrodynamiques sur le maillage structural,

$$\text{— } C_{ad}, C_{hd}, C_{hm} \text{ les matrice de traînées et de masses fluidiques avec } C_{xx} = \begin{bmatrix} \ddots & & & \\ & C_{xx,i} & & \\ & & \ddots & \\ & & & \ddots \end{bmatrix},$$

$$\text{— } \mathbf{V}_h = \begin{pmatrix} \vdots \\ \mathbf{v}_{h,i} \\ \vdots \end{pmatrix}, \mathbf{W}_{hk} = \begin{pmatrix} \vdots \\ \mathbf{v}_{x,i} |\mathbf{v}_{x,i}| \\ \vdots \end{pmatrix} \text{ vecteurs des vitesses et leurs harmoniques de Fourier.}$$

### 3.2.2 Erreur sur les lois de comportement hydrodynamiques et aérodynamiques

De par leurs origines expérimentales, les lois de comportement fluidiques de Morison et Bernoulli (Eq. 9) se placent dans la catégorie des équations non fiables propres à l'ERCm. Elles sont donc relaxées et prises en compte dans le recalage par pénalisation via l'utilisation d'erreurs associées : les erreurs en relation de comportement fluidique. Ces dernières viennent s'ajouter à l'erreur en relation de comportement mécanique dans la fonction coût de recalage (Eq. 2).

Une loi de comportement est le pont entre deux grandeurs dont le produit est une énergie locale, dans notre cas fluidique une force linéique  $\mathbf{f}$  et une vitesse  $\mathbf{v}$  mais structurellement il peut s'agir du tenseur de Cauchy  $\boldsymbol{\sigma}$  et du tenseur de déformation  $\boldsymbol{\varepsilon}$ . Dans un problème classique de mécanique une loi de comportement permet de lier des *équations d'équilibre* (ici Eq. 10), qui sont exprimées grâce à un bilan sur les forces, aux *équations cinématiques* (ici Eq. 5 et Eq. 6) qui quantifient une information sur un mouvement ou une déformation.

Une fois la relation de comportement relâchée ce pont n'existe plus et des couples de *champs admissibles*  $(\tilde{\mathbf{v}}^{(e)}, \tilde{\mathbf{f}}^{(e)})$ ,  $(\tilde{\mathbf{v}}^{(c)}, \tilde{\mathbf{f}}^{(c)})$  sont alors définis. Les champs de chaque couple sont reliés par la loi de comportement et respectent séparément soit les équations cinématiques soit les équations d'équilibre :

$$\begin{aligned} (\tilde{\mathbf{v}}^{(e)}, \tilde{\mathbf{f}}^{(e)} = \mathcal{LC}(\tilde{\mathbf{v}}^{(e)})) & \text{ avec } \tilde{\mathbf{f}}^{(e)} \text{ vérifie l'équilibre : Eq. (10)} \\ (\tilde{\mathbf{v}}^{(c)}, \tilde{\mathbf{f}}^{(c)} = \mathcal{LC}(\tilde{\mathbf{v}}^{(c)})) & \text{ avec } \tilde{\mathbf{v}}^{(c)} \text{ vérifie une des cinématiques : Eq. (5,6)} \end{aligned} \quad (11)$$

Le problème direct est défini dans ce cadre de recalage comme la sélection des champs qui vérifient les équations fiables et optimisent la vérification par pénalisation des équations non fiables et des données. Ce sont les *champs solutions*  $(\mathbf{v}^{(c)}, \mathbf{v}^{(e)})$  et sont obtenus par une première minimisation sous contrainte de l'ERCm (Eq. 13). Elle se résout généralement par l'utilisation d'un Lagrangien.

$$(\mathbf{v}^{(c)}, \mathbf{v}^{(e)}) = \underset{(\tilde{\mathbf{v}}^{(c)}, \tilde{\mathbf{v}}^{(e)})}{\operatorname{argmin}} E_{ERCm}^2(\mathbf{p}, \tilde{\mathbf{v}}^{(c)}, \tilde{\mathbf{v}}^{(e)}) \quad (12)$$

Une deuxième minimisation de l'ERCm permet d'obtenir une valeur optimisée des paramètres à recalcr (Eq. 13). Elle se résout généralement de façon itérative par descente de gradient.

$$\mathbf{p}_s = \underset{\mathbf{p} \in P}{\operatorname{argmin}} E_{ERCm}^2(\mathbf{p}, \mathbf{v}^{(c)}, \mathbf{v}^{(e)}) \quad (13)$$

avec  $\mathbf{p}$  la variables des paramètres de contrôles et  $\mathbf{p}_s$  sa valeur solution.

Dans le cadre d'interactions fluides-structures linéarisées, il y a trois lois de comportement  $\mathcal{A}_d$ ,  $\mathcal{H}_d$ ,  $\mathcal{H}_m$  qui dessinent la dépendance des forces fluidiques aux harmoniques de vitesses :

$$\begin{aligned} \mathbf{f}_{ad} &= C_{ad} \mathbf{w}_{a0} \\ \mathbf{f}_{hd} &= C_{hd} (\mathbf{w}_{h1} + \mathbf{w}_{h3}) \\ \mathbf{f}_{hm} &= C_{hm} \dot{\mathbf{v}}_h \end{aligned} \quad (14)$$

Dans sa formulation la plus généraliste, l'erreur en relation de comportement prend la forme de l'erreur de Drucker [5], dans laquelle le produit énergétique issu des lois structurelles a été substitué par celles d'intérêt ici :

$$E_{ERC|x}^2(T) = \sup_{\tau \leq T} \int_0^\tau \int_{\Omega} (\mathbf{f}_x^{(c)} - \mathbf{f}_x^{(e)}) \cdot (\mathbf{v}_x^{(c)} - \mathbf{v}_x^{(e)}) d\Omega dt \quad (15)$$

avec  $T$  le temps de simulation,  $\Omega$  le domaine matériel.

Le développement de l'erreur de Drucker dans le cas d'une cinématique aérodynamique continue (Eq. 5), d'une cinématique hydrodynamique de pulsation  $\omega$  (Eq. 6) et appliqué au formalisme éléments finis donne les valeurs suivantes d'erreurs en relation de comportement :

$$\begin{aligned}
E_{ERC|ad,\omega}^2 &= (\mathbf{W}_{A,a0}^{(c)} - \mathbf{W}_{A,a0}^{(e)})^T \mathbb{C}_{ad} (\mathbf{W}_{A,a0}^{(c)} - \mathbf{W}_{A,a0}^{(e)}) \\
E_{ERC|hd,\omega}^2 &= (\mathbf{W}_{A,h1}^{(c)} - \mathbf{W}_{A,h1}^{(e)})^T \frac{T}{2} \mathbb{C}_{hd} (\mathbf{W}_{A,h1}^{(c)} - \mathbf{W}_{A,h1}^{(e)}) \\
&\quad + (\mathbf{W}_{A,h3}^{(c)} - \mathbf{W}_{A,h3}^{(e)})^T \frac{T}{2} \mathbb{C}_{hd} (\mathbf{W}_{A,h3}^{(c)} - \mathbf{W}_{A,h3}^{(e)}) \\
E_{ERC|hm,\omega}^2 &= (\mathbf{V}_{A,h}^{(c)} - \mathbf{V}_{A,h}^{(e)})^T \mathbb{C}_{hm} (\mathbf{V}_{A,h}^{(c)} - \mathbf{V}_{A,h}^{(e)})
\end{aligned} \tag{16}$$

avec  $\mathbf{Z}_A$  l'amplitude d'un vecteur harmonique quelconque  $\mathbf{Z}$  tel que  $\mathbf{Z} = \mathbf{Z}_A \cos(\omega t + \phi)$ .

Finalement la formulation de l'ERCm vibratoire s'écrit :

$$\begin{aligned}
E_{ERCm,\omega}^2 &= E_{ERC|meca,\omega}^2 + E_{ERC|aero,\omega}^2 + E_{ERC|hydro,\omega}^2 + \frac{\alpha}{2} \|\mathbf{u}_\omega - \mathbf{u}_{obs,\omega}\|_{L^2}^2 \\
&= E_{ERC|meca,\omega}^2 + E_{ERC|ad,\omega}^2 + E_{ERC|hd,\omega}^2 + E_{ERC|hm,\omega}^2 + \frac{\alpha}{2} \|\mathbf{u}_\omega - \mathbf{u}_{obs,\omega}\|_{L^2}^2
\end{aligned} \tag{17}$$

### 3.3 Application de l'ERCm au recalage de modèle éolien

L'objectif du problème de recalage considéré est de déterminer le jeu de paramètres de contrôle  $\mathbf{p}$  (Fig. 5) qui rassemble les paramètres évalués comme étant les plus incertains et les plus influents sur la réponse du modèle éolien :

$$\mathbf{p} = \{(\alpha), (\beta), (c_{hd}), (c_{hm}), c_{d,turbine}, (k_{sol})\} \tag{18}$$

avec :

- $(\alpha)$  et  $(\beta)$  les amortissements structuraux locaux de Rayleigh,
- $(c_{hd})$  et  $(c_{hm})$  les coefficients locaux hydrodynamiques de traînées et de masses,
- $c_{d,turbine}$  le coefficient de traînée de la turbine,
- $k_{sol}$  les coefficients de raideur de sol.

Les informations jugées peu fiables suites à l'application du concept ERCm sont présentées dans la table 1. L'équilibre (Eq. 10) et les cinématiques de vents et vagues (Eq. 5,6) sont jugés fiables. La somme des erreurs associées aux informations non fiables constitue la fonction coût  $E_{ERCm,\omega}^2(\mathbf{p})$  dont les deux minimisations successives permettent de trouver la valeur optimale des paramètres  $\mathbf{p}_s$ . L'indice  $\omega$  indique que la fonctionnelle est calculée pour un harmonique de vague.

TABLE 1 – Classification des informations non fiables et erreurs associées

Information	Formulation continue	Formulation EF	Erreur harmonique associée
Mesures	$\Pi \mathbf{u} = \mathbf{u}_{obs}$	$\Pi \mathbf{U} = \mathbf{U}_{obs}$	$\ \mathbf{U}_\omega - \mathbf{U}_{obs,\omega}\ _{L^2}^2$
Loi d'inertie	$\Gamma = \rho \ddot{\mathbf{u}}$	$\mathbb{M} \ddot{\mathbf{U}}$	$(\mathbf{U}_{A,in}^{(c)} - \mathbf{U}_{A,in}^{(e)}) \omega^2 \mathbb{M} (\mathbf{U}_{A,in}^{(c)} - \mathbf{U}_{A,in}^{(e)})$
Loi d'élasticité	$\boldsymbol{\sigma} = \mathcal{B} \dot{\boldsymbol{\varepsilon}} + \mathcal{K} \boldsymbol{\varepsilon}$	$\mathbb{B} \dot{\mathbf{U}} + \mathbb{K} \mathbf{U}$	$(\mathbf{U}_{A,el}^{(c)} - \mathbf{U}_{A,el}^{(e)}) (\mathbb{K} + T \omega^2 \mathbb{B}) (\mathbf{U}_{A,el}^{(c)} - \mathbf{U}_{A,el}^{(e)})$
$\mathcal{A}_d$	$\mathbf{f}_{ad} = \mathbb{C}_{ad} \mathbf{w}_{a0}$	$\mathbb{P}_a \mathbb{C}_{ad} \mathbf{W}_{a0}$	$(\mathbf{W}_{A,a0}^{(c)} - \mathbf{W}_{A,a0}^{(e)})^T \mathbb{C}_{ad} (\mathbf{W}_{A,a0}^{(c)} - \mathbf{W}_{A,a0}^{(e)})$
$\mathcal{H}_d$	$\mathbf{f}_{hd} = \mathbb{C}_{hd} (\mathbf{w}_{h1} + \mathbf{w}_{h3})$	$\mathbb{P}_h \mathbb{C}_{hd} (\mathbf{W}_{h1} + \mathbf{W}_{h3})$	$(\mathbf{W}_{A,h1}^{(c)} - \mathbf{W}_{A,h1}^{(e)})^T \frac{T}{2} \mathbb{C}_{hd} (\mathbf{W}_{A,h1}^{(c)} - \mathbf{W}_{A,h1}^{(e)})$ $+ (\mathbf{W}_{A,h3}^{(c)} - \mathbf{W}_{A,h3}^{(e)})^T \frac{T}{2} \mathbb{C}_{hd} (\mathbf{W}_{A,h3}^{(c)} - \mathbf{W}_{A,h3}^{(e)})$
$\mathcal{H}_m$	$\mathbf{f}_{hm} = \mathbb{C}_{hm} \dot{\mathbf{v}}_h$	$\mathbb{P}_h \mathbb{C}_{hm} \dot{\mathbf{V}}_h$	$(\mathbf{V}_{A,h}^{(c)} - \mathbf{V}_{A,h}^{(e)})^T \mathbb{C}_{hm} (\mathbf{V}_{A,h}^{(c)} - \mathbf{V}_{A,h}^{(e)})$

## 4 Résultats Préliminaires

Les développements numériques ont été dédiés à la création du code du Modèle Viable Minimum (MVM) éolien défini dans la section 3.1 (Fig. 6 et 7), à la formulation d'un écart modèles-mesures reposant sur l'ERCm vibratoire (Fig. 8) et à l'optimisation des paramètres  $\mathbf{p}$  par minimisation de cet écart.

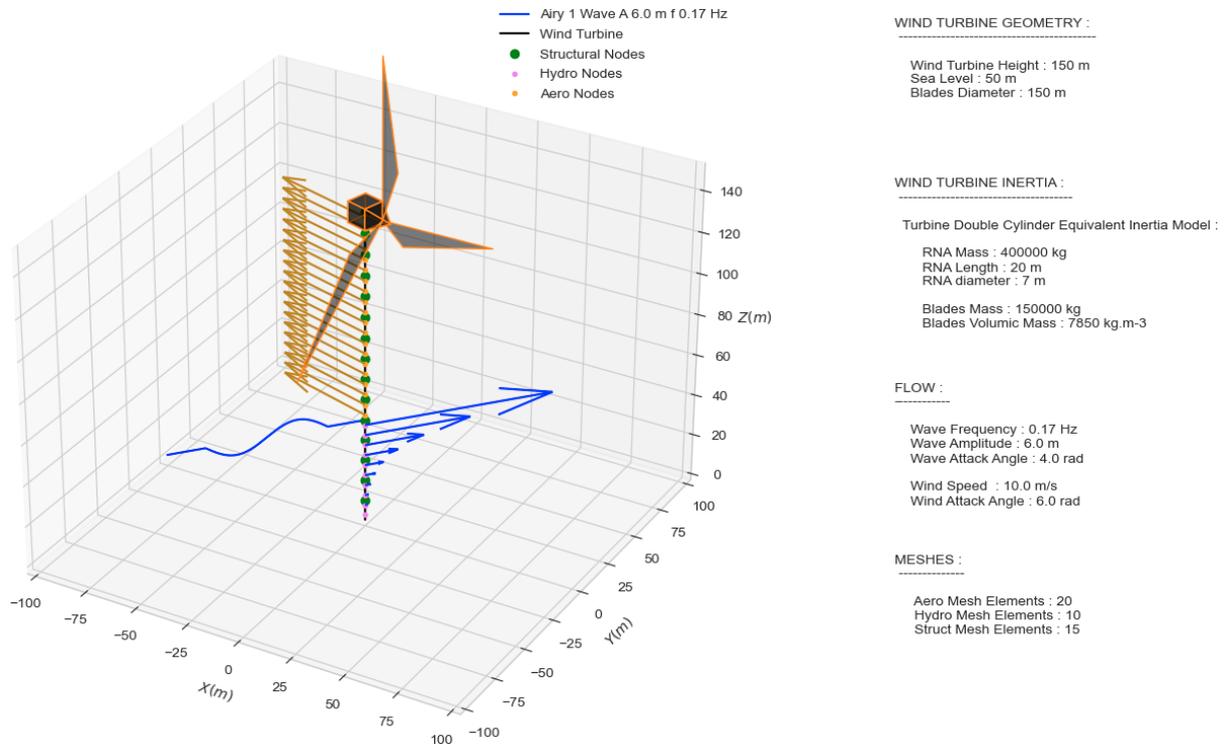


FIGURE 6 – Géométrie, Inertie et Chargements Fluidique du MVM

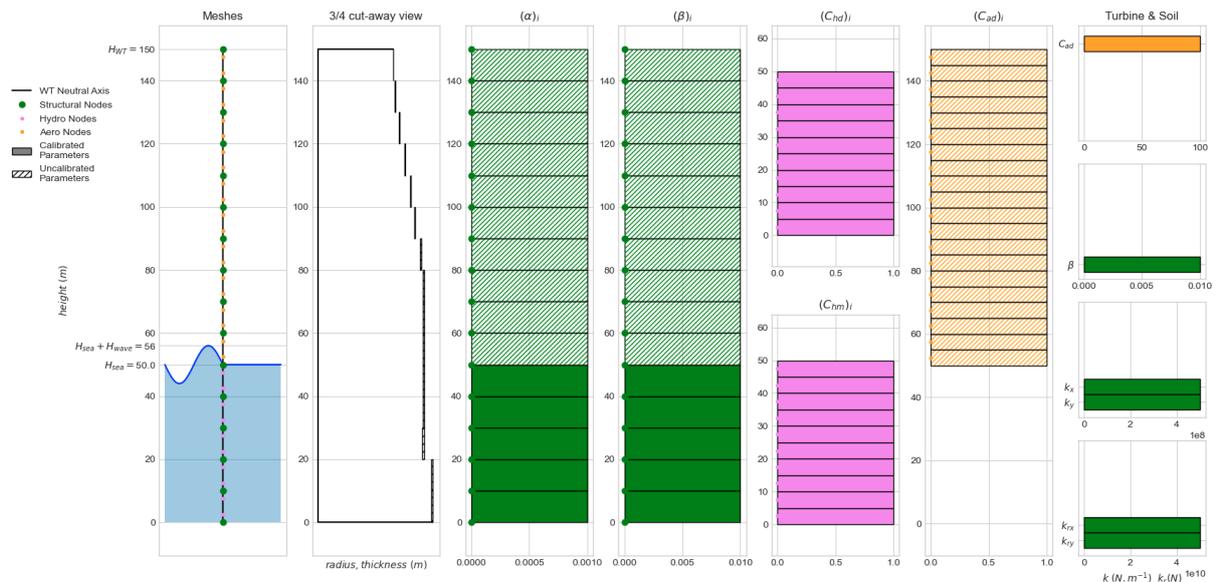


FIGURE 7 – Paramétrisation de modélisation du MVM

En l'état actuel du travail de recherche, le modèle à recaler calque la géométrie, l'inertie et le chargement des éoliennes instrumentées de Blyth (Fig. 1) dans la mesure présentée dans la figure 6. Les cinématiques de la mer (bleu) et du vent (orange) représentées sont celles définies dans les équations (5) et (6) pour des amplitudes et fréquences standards. La figure 7 détaille le profil poutre de la sous-structure, de la tour et les valeurs locales des paramètres de modélisation du MVM en mettant en évidence ceux sujet au recalage. Les développements en cours ont pour but de déterminer les valeurs de ces paramètres respectant au mieux un jeu de données d'opération synthétiques image des éoliennes de Blyth. Pour ce faire, les erreurs en lois de comportement définies précédemment seront calculées localement comme présentée en figure 8. Les paramètres des zones les plus erronées seront optimisés successivement par descente de gradient.



FIGURE 8 – Déclinaison de l'ERCm selon les différentes lois de comportement (valeurs arbitraires)

## Références

- [1] J-P. Argaud, B. Bouriquet, F. de Caso, H. Gong, Y. Maday, O. Mula. *Sensor placement in nuclear reactors based on the generalized empirical interpolation method*, Journal of Computational Physics, 354-370, 2018.
- [2] C. Bertoglio et al. *Identification of artery wall stiffness : in vitro validation and in vivo results of a data assimilation procedure applied to a 3D fluid-structure interaction model*, Journal of Biomechanics, Elsevier, 2014.
- [3] M. Capaldo, J-B. Orsatelli, J. Curt. *Influence of cracks on the buckling of wind turbine towers*, J. Phys. : Conf. Ser. 1618 022001, IOP Publishing, 2020.
- [4] M. Capaldo et al. *Design brief of HIPERWIND offshore wind turbine cases : bottom fixed 10MW and floating 15MW*, Hiperwind Horizon 2020 project, IOP Publishing, 2020.
- [5] A. Chouaki. *Thèse de Doctorat : Recalage de modèles dynamiques de structures avec amortissement*, Laboratoire de Mécanique et Technologie, 1997.
- [6] V. Decouvreur, P. Ladevère, Ph. Bouillard. *Updating 3D acoustic models with the constitutive relation error method : A two-stage approach for absorbing material characterization*, Journal of Sound and Vibration, Elsevier, 985-997, 2007.
- [7] A. Deraemaeker, P. Ladeveze, T. Romeuf. *Model Validation in the presence of uncertain experimental data*, Engineering Computations 21(8), 808-833, 2004.
- [8] P. Feissel, O. Allix. *Modified constitutive relation error identification strategy for transient dynamics with corrupted data : The elastic case*, Comput. Methods Appl. Mech. Engrg. 196, 1968-1983, 2007.
- [9] J. Warner, M. Diaz, W. Aquino, M. Bonnet, *Inverse material identification in coupled acoustic-structure interaction using a modified error in constitutive equation functional*, Comput Mechanics, Springer, 645-659, 2014