

# Modélisation numérique multi-échelle non linéaire d'un câble d'énergie

L. Zeidan<sup>1</sup>, P. Cartraud<sup>1</sup>, L. Stainier<sup>1</sup>

*1 GeM, Ecole Centrale de Nantes, France, {lara.zeidan, patrice.cartraud, laurent.stainier}@ec-nantes.fr*

**Résumé** — L'étude porte sur la modélisation d'un câble d'énergie utilisé pour l'éolien flottant. Ce câble présente un comportement en flexion non linéaire et dépendant de l'histoire, qui résulte de contacts frottants entre ses constituants. Une approche de type FE<sup>2</sup> est développée pour réaliser le couplage entre le modèle poutre d'ensemble du câble et un modèle 3D détaillé d'un tronçon de petite taille.

**Mots clés** — Multi-échelle, élément finis au carré, câble.

## 1. Introduction

Nous nous intéressons ici à la modélisation d'un câble de transport d'énergie, utilisé pour l'éolien flottant. Ce câble, dit dynamique, relie l'éolienne à un autre câble, dit statique, enfoui dans le sol, ce dernier ramenant l'électricité à terre, cf. Figure 1.

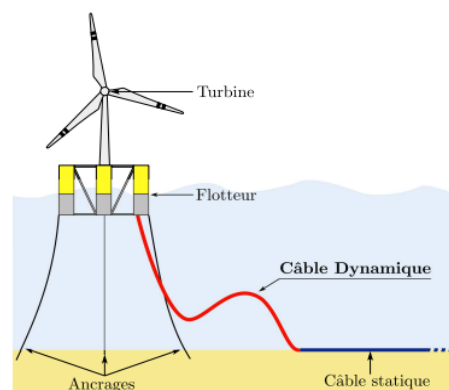


Figure 1 – Éolienne flottante et câble dynamique

Le câble dynamique est soumis en service aux actions hydrodynamiques et au mouvement du flotteur, ce qui entraîne des sollicitations de traction et de flexion principalement. La longueur de ce câble est de l'ordre de quelques dizaines de mètres, pour un diamètre de section de l'ordre de la dizaine de centimètres. Ainsi l'analyse globale du câble repose sur un modèle de type poutre, dont il s'agit de définir le comportement.

La constitution interne du câble dynamique, voir Figure 2, met en évidence sa forte hétérogénéité. Il est ainsi composé notamment de plusieurs constituants métalliques : en cuivre dans la zone centrale du câble pour la partie conductrice et en acier sur sa périphérie pour renforcer sa structure, réalisés sous la forme de fils hélicoïdaux assemblés en couches concentriques. L'ensemble est maintenu dans une gaine plastique permettant d'isoler les parties métalliques du milieu marin. Cette constitution conduit en flexion à un comportement non-linéaire et dépendant de l'histoire de chargement, dû aux interactions de contact.

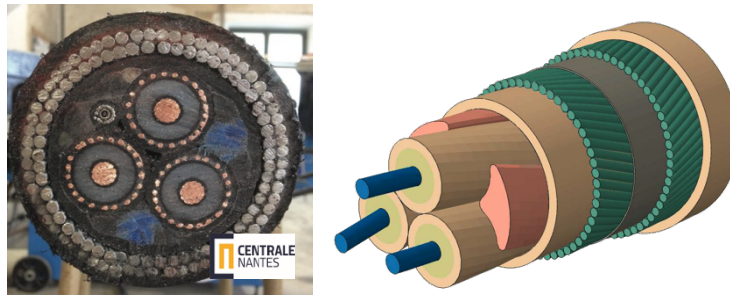


Figure 2 – Détails de la constitution d'un câble dynamique [1]

De ce fait, il est nécessaire de mettre en place une approche multi-échelle pour alimenter le comportement macroscopique de la poutre à partir d'une analyse microscopique d'un tronçon élémentaire du câble. Pour cette dernière, la géométrie hélicoïdale des constituants permet de se ramener à modèle 3D de faible longueur, sur lequel sont appliquées des conditions aux limites périodiques [2]. Le caractère non-linéaire du comportement à l'échelle microscopique entraîne *a priori* un couplage fort entre les échelles macroscopiques et microscopiques.

Dans ce travail, une première approche consiste donc à mettre en œuvre une approche de type FE<sup>2</sup> [1], couplant le modèle macroscopique de type poutre au modèle microscopique 3D.

## 2. Modélisation numérique du câble

Afin de simplifier la géométrie, un câble constitué d'une âme centrale et de 6 fils hélicoïdaux est considéré.

### 2.1. Modélisation microscopique

Une modélisation détaillée à l'échelle microscopique d'un tronçon de câble est réalisé à l'aide d'un modèle 3D développé avec le logiciel Abaqus, voir Figure 3a.

. La longueur axiale de ce modèle est égale à un sixième de la longueur axiale du pas des fils hélicoïdaux. L'âme et les fils hélicoïdaux sont représentés par des éléments poutre, avec des éléments surfaciques à la périphérie de la section circulaire pour gérer les interactions de contact frottant entre les constituants.

Avec ce modèle, les problèmes à résoudre se caractérisent par une donnée de type macro-déformation imposée et des conditions aux limites périodiques. Ces macro-déformations sont des déformations de poutre, à savoir une extension, une déformation de torsion et deux courbures. Plus de détails sont donnés dans [2].

A titre d'exemple, si une courbure est appliquée après une extension initiale, un contact avec une transition collant glissant est observé, comme illustré sur la Figure 3b.

### 2.2. Couplage micro – macro

Comme indiqué en introduction, une approche de type FE<sup>2</sup> est appliquée ici pour réaliser le couplage entre les échelles microscopique et macroscopique, étant entendu qu'à cette dernière échelle un modèle de type poutre est utilisé. La méthode FE<sup>2</sup> est particulièrement adaptée à l'analyse de structures présentant des non-linéarités géométriques significatives, telles que de grands déplacements, et les interactions de contact.

Pour appliquer la méthode FE<sup>2</sup>, le processus consiste à itérer entre les modèles macro et micro. L'approche démarre par la résolution du problème macro, une valeur initiale étant donnée pour les

raideurs. A l'issue de cette résolution et à chaque point d'intégration du modèle, sont extraits les macro-déformations et efforts internes, de type poutre. Ces macro-déformations sont ensuite imposées au modèle micro, qui permet le calcul d'efforts internes homogénéisés, dont les valeurs sont comparées aux efforts internes issus du modèle poutre. Si l'écart est supérieur à une tolérance exprimée en pourcentage, les raideurs du modèle macro sont alors remplacées par celles calculées à l'échelle micro et un nouveau calcul macro de poutre est réalisé, jusqu'à ce que la solution converge.

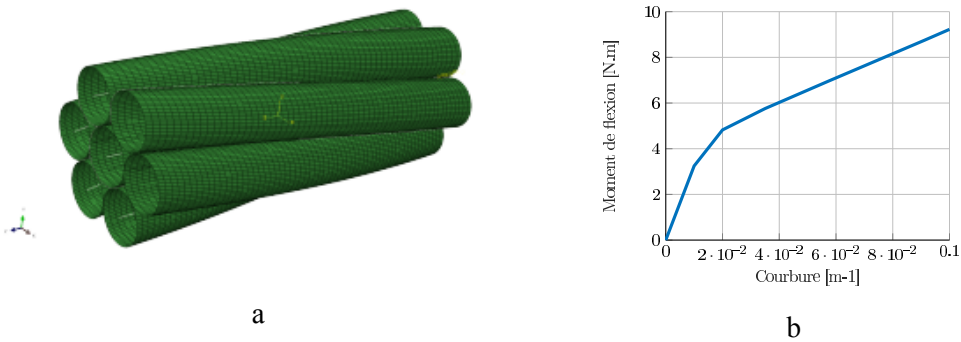


Figure 3 – Modèle microscopique 3D du câble et exemple de comportement en flexion

A titre d'exemple le cas d'une poutre encadrée et soumise à un effort concentré à l'autre extrémité est étudié. Tout d'abord un effort normal est imposé, après quoi un effort tranchant est appliqué. Ceci conduit pour ce chargement de flexion à des situations de contact collants puis glissants. La solution FE<sup>2</sup> sur la flèche est comparée à une analyse détaillée 3D, dans laquelle une modélisation semblable à celle décrite Figure 3a est réalisée sur toute la longueur de la poutre. Un bon accord entre les deux approches est observé, cf. Figure 4, ce qui valide la mise en œuvre de FE<sup>2</sup>.

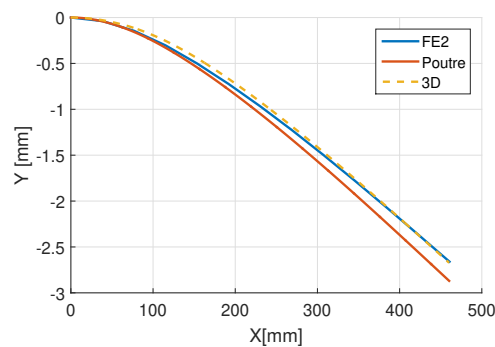


Figure 4 – Comparaison entre les approches FE<sup>2</sup> et 3D

### 3. Conclusion

Cette étude porte sur le développement d'une approche multi-échelle pour un problème non linéaire de type contact frottant. Une approche de type FE<sup>2</sup> a ainsi été développée et validée sur un cas test. Cette approche réalise un couplage fort entre les deux échelles, et engendre donc un coût de calcul important. En particulier, les calculs menés aux différents points d'intégration sont réalisés de façon indépendante. Une alternative serait donc de développer une approche de type data-driven [3], dans laquelle le comportement macroscopique serait calculé dans une première étape, dans l'espace

des macro-déformations et efforts internes, et disponible lors du calcul macro. Il faut cependant remarquer ici une difficulté liée à la dépendance des solutions microscopiques vis-à-vis de l'histoire du chargement.

Une autre possibilité serait d'identifier un comportement non linéaire macroscopique pour la poutre, à partir de la résolution d'un ensemble de problèmes à l'échelle micro. Ceci conduit certes à une approximation de la complexité du comportement mis en évidence, mais a le gros avantage de rendre le calcul macro indépendant de l'échelle micro.

Ces deux alternatives, data-driven et modèle macro non-linéaire de poutre, sont actuellement à l'étude et seront comparés par la suite.

Par ailleurs, au delà des aspects numériques, des essais de type flexion 3 ou 4 points sont réalisés sur le câble ou des sous-parties de celui-ci, en particulier les parties conductrices, pour évaluer la précision des modèles numériques.

## **Remerciements**

Ce travail fait partie du projet France-Atlantique, qui a été financé par l'Etat dans le cadre de France 2030 opéré par l'ADEME.

## **Références**

- [1] Feyel, F. Multiscale FE2 elastoviscoplastic analysis of composite structures. *Computational Materials Science*, 16(1-4), 344-354, 1999.
- [2] F. Ménard, P. Cartraud. A computationally efficient finite element model for the analysis of the non-linear bending behaviour of a dynamic submarine power cable, *Marine Structures*, 2023.
- [3] K. Karapiperis, L. Stainier, M. Ortiz, JE. Andrade, Data-driven multiscale modeling in mechanics, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 2021.