



Science@ifpen

N° 34 - Octobre 2018

NUMÉRO SPÉCIAL
Mécanique appliquée



La maîtrise de la transition énergétique nécessite le déploiement industriel de nouvelles technologies pour exploiter des ressources renouvelables et

décarbonées. C'est le cas de l'éolien flottant qui s'accompagne de nouveaux enjeux scientifiques et techniques, liés à des conditions d'exploitation sévères. L'exploitation durable de ces ressources énergétiques, dans un contexte très concurrentiel, nécessite la mise en œuvre conjointe d'un savoir-faire et de solutions innovantes fondées sur une recherche scientifique de qualité. Cette exigence concerne aussi les domaines d'application historiques d'IFPEN confrontés à des problématiques de coûts et d'impact environnemental.

Pour tout cela, nos chercheurs en mécanique appliquée s'attachent à valoriser leurs acquis, notamment issus de l'offshore, au travers de défis scientifiques dont la résolution combine expérimentation (y compris à grande échelle), modélisation et simulation numérique dans nombre de domaines : écoulements complexes, hydrodynamique, aérodynamique, couplages fluide-structure, comportements non linéaires des matériaux et des structures. Ce numéro propose des exemples de réalisations en mécanique numérique au service des nouvelles technologies de l'énergie. Bonne lecture.

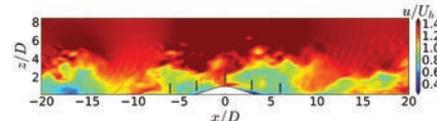
*Laurent Cangémi,
Adjoint scientifique au directeur
Direction Physico-chimie et Mécanique appliquées*

Parcs éoliens - un agencement plus efficace grâce à la modélisation

Le développement des parcs éoliens nécessite un placement optimal des éoliennes les unes par rapport aux autres afin de maximiser la production de l'ensemble. Si les turbines sont trop proches, les effets de sillage empêchent de fournir la pleine puissance et peuvent conduire à des problèmes de fatigue mécanique par effet de turbulence. Si elles sont trop éloignées, la ressource en vent n'est pas exploitée de manière optimale.

Les pertes de puissance dues au sillage actuellement mesurées en offshore peuvent atteindre les 40 %. Ainsi, optimiser le placement des éoliennes devient un véritable enjeu et simuler de manière précise l'écoulement du vent au travers du parc est le moyen d'y parvenir. Cela est obtenu en modélisant les effets de sillages des éoliennes dans des conditions météorologiques représentatives, notamment du point de vue de la couche limite atmosphérique^a.

Un tel modèle, élaboré par IFPEN, a été implémenté dans Meso-NH⁽¹⁾, le modèle météorologique à maille fine développé par le CNRM (Centre national de recherches météorologiques) et le Laboratoire d'aérodynamique. Les éoliennes y sont représentées par les efforts aérodynamiques qu'elles génèrent (traînée, portance), déterminés par des modèles simplifiés. Ainsi, le sillage des éoliennes est défini grâce à l'interaction des efforts aérodynamiques avec le vent, lui-même influencé par les phénomènes



Champs de vent calculés par Meso-NH sur une configuration testée en soufflerie.

météorologiques. Les études de validation ont été réalisées, sur la base d'essais en soufflerie (maquette représentant cinq éoliennes sur une colline). La comparaison calcul/expérience a été effectuée en étudiant les profils verticaux de vitesse de vent et d'intensité de turbulence, en aval de chacune des éoliennes⁽¹⁾. Il se vérifie donc que la prise en compte des conditions météorologiques apporte une meilleure prédiction du sillage généré par un parc éolien.

Ce nouvel outil va être employé pour étudier l'influence des conditions atmosphériques propres à l'offshore, afin d'optimiser l'agencement et la productivité des parcs, et pour analyser leur impact environnemental potentiel sur la météorologie locale. ■

a - Partie de l'atmosphère où la présence de la surface terrestre (continentale ou océanique) est directement sensible.

(1) P-A. Joulin et al., EWEA PhD Seminar, 2018.

Contacts scientifiques :
frederic.blondel@ifpen.fr
pierre-antoine.joulin@meteo.fr

IFP Energies nouvelles (IFPEN) est un acteur majeur de la recherche et de la formation dans les domaines de l'énergie, du transport et de l'environnement. De la recherche à l'industrie, l'innovation technologique est au cœur de son action.



Les polymères semi-cristallins : des argiles qui s'ignorent ?

Dans le secteur de l'énergie, les polymères semi-cristallins^a sont principalement utilisés au sein de structures évoluant en milieu agressif, afin de constituer des revêtements (barrière d'étanchéité, isolant thermique ou électrique). Ces matériaux possèdent une flexibilité intrinsèque mise à profit dans certaines applications offshore, notamment les conduites de production pétrolière, mais ils sont aussi présents dans les câbles électriques pour l'éolien offshore.

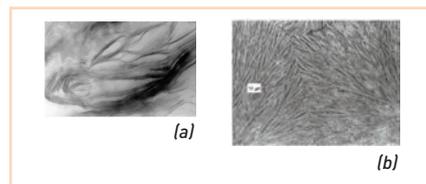
Au travers de ces différentes applications, les polymères peuvent être soumis à une variété de sollicitations sévères : pression (>1 000 bar), houle, tension électrique, températures (de -20 °C à 150 °C), diffusion de fluides ou de gaz. Dans ce dernier cas, la pénétration d'espèces chimiques au sein des polymères peut affecter leur comportement mécanique par des mécanismes multiphysiques générateurs d'endommagement : de la création de microcavités jusqu'à l'apparition de fissures pouvant mener à la rupture.

Vers un modèle poro-chimio-mécanique

Afin de décrire l'intégrité des polymères semi-cristallins en environnement sévère, un modèle inspiré des matériaux naturels poreux et peu perméables, comme les argiles, a été développé à IFPEN. Celui-ci permet de considérer les couplages multiphysiques d'un point de vue à la fois théorique et numérique.

L'analogie avec les argiles se fonde sur l'arrangement microstructural (figure) et sur le comportement mécanique viscoplastique. Mais au-delà de cette comparaison, c'est un modèle phénoménologique capable d'introduire des couplages entre déformation et diffusion d'espèces qui a été mis en place.

Ainsi, le parallèle avec des milieux poreux naturels, associé à un cadre théorique rigoureux, a récemment permis de traiter des phénomènes complexes comme la cavitation sous pression-diffusion, la fragilisation par hydrolyse et la compétition entre mécanismes de rupture (fragile ou avec plasticité)^[1].



Microstructure d'une argile (a) et d'un polymère semi-cristallin (b).

Une perspective d'enrichissement de ce modèle est de décrire l'endommagement par diffusion des arcs électriques, au sein des revêtements pour les câbles électriques immergés. ■

a - Comportant une phase cristalline et une phase amorphe

[1] S. Maiza, X. Lefebvre, N. Brusselle, M-H. Klopffer, L. Cangemi, S. Castagnet, J.C. Granddier. Soumis à *Journal of Applied Polymer Science*.

Contacts scientifiques :
nadege.brusselle@ifpen.fr
laurent.cangemi@ifpen.fr

Amélioration des modèles hydrodynamiques pour l'éolien flottant

Le développement de supports flottants pour les éoliennes offshore, en remplacement des fondations fixes, permet d'envisager l'exploitation de ressources en vent dans des zones de grande profondeur d'eau. Le potentiel est prometteur, évalué à 16 GW en France métropolitaine à l'horizon 2040^a.

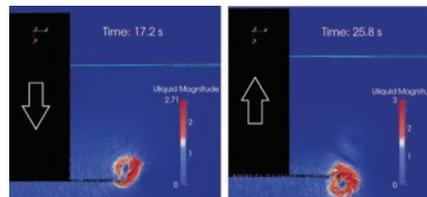
La conception et le dimensionnement de ces nouvelles structures reposent sur le calcul des efforts générés par la houle et des mouvements induits au niveau du flotteur. Ces calculs sont actuellement réalisés avec les logiciels dédiés, issus de l'industrie pétrolière offshore^b, et qui utilisent des modèles hydrodynamiques simplifiés. En outre, le comportement d'une éolienne flottante est assez éloigné de celui d'une plateforme pétrolière et les enjeux économiques tout comme les risques industriels sont également différents. Ceci conduit IFPEN à réévaluer les méthodes et outils de dimensionnement actuels.

La méthodologie consiste à comparer des simulations CFD d'une éolienne flottante en mouvement, réalisées grâce à un

logiciel *open source*^d, avec les résultats issus des modèles simplifiés habituels. L'objectif est d'évaluer la pertinence de ces derniers et de les améliorer si nécessaire, soit en revoyant leur formulation soit en les recalibrant.

Cette démarche a d'abord été entreprise sur des cas simples — flotteur fixe avec de la houle, d'une part, et flotteur en mouvement sans houle, d'autre part — permettant ainsi une comparaison avec des résultats expérimentaux. Déployée pour évaluer des dispositifs d'amortissement du mouvement (figure), elle a produit des résultats satisfaisants^[1-2].

La même approche, mise en œuvre dans le cas d'un flotteur développé conjointement avec SBM Offshore, a fourni des premiers résultats prometteurs quant à l'amélioration des modèles hydrodynamiques des outils de conception d'IFPEN. ■



Visualisation du champ de vitesse autour d'une plaque d'amortissement, lors d'un mouvement vertical du flotteur.

[1] P. Bozonnet, A. Emery, 25th International Ocean and Polar Engineering Conference, 21-26 June, Kona, Hawaii, USA.

[2] A. Emery, P. Bozonnet, Heave plate damping and added mass evaluation based on CFD simulations for floating wind turbine platforms. Submitted to *Applied Ocean Research*.

Contact scientifique :
pauline.bozonnet@ifpen.fr

a - Les Echos du 19 février 2018

b - Logiciel DeepLines Wind développé avec Principia

c - Computational Fluid Dynamics

d - Logiciel OpenFOAM

Chaleur en stock

Le stockage de l'énergie, enjeu majeur dans la transition énergétique, peut se faire sous différentes formes. Pour le stockage de chaleur, une des solutions développées à IFPEN est basée sur un lit fixe de particules. Le fluide caloporteur s'écoule à travers ce lit pour stocker ou récupérer la chaleur dans les particules par transfert thermique⁽¹⁾.

Du fait de la complexité de ces systèmes de stockage (grand nombre de particules et non-linéarité des régimes étudiés), l'utilisation du calcul numérique se révèle indispensable à leur dimensionnement. Pour ce faire, un grand nombre de calculs a été réalisé pour évaluer l'impact de la variabilité des différents paramètres (matériau, taille et forme des particules, type de fluides) sur les performances globales du dispositif.

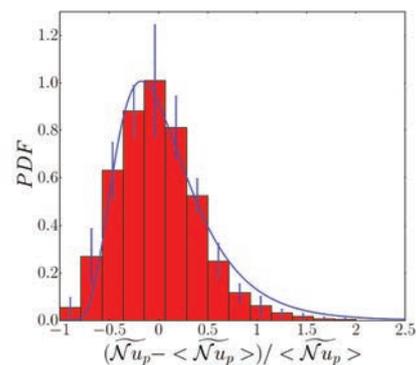
Ce travail a mis en exergue deux résultats fondamentaux :

- les transferts thermiques au sein du lit varient localement de manière non négligeable (figure). Aussi, les approches

classiques, intégrant un transfert moyen dans le lit, doivent-elles être enrichies pour tenir compte de ces fluctuations locales ;

- la définition de la température de référence du fluide, nécessaire à l'évaluation des transferts thermiques fluide-particules, n'est pas triviale du fait de l'existence d'une distribution de température dans le lit. Les simulations ont toutefois confirmé sa pertinence lorsqu'elle est prise « à l'infini », c'est-à-dire loin de l'emplacement du lit où ce calcul est effectué.

Les perspectives de ces travaux sont multiples : en particulier, le développement de lois de transferts thermiques, prenant en compte les effets des hétérogénéités locales, permettrait de faire un bond considérable dans le dimensionnement des lits industriels. ■



Distribution du nombre de Nusselt^a au sein d'un lit fixe, calculée par l'approche locale.

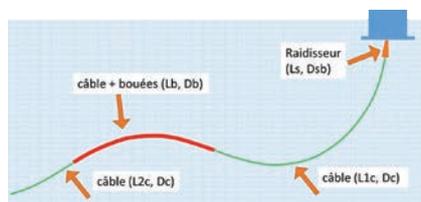
a - Nombre adimensionnel qui traduit l'intensité de l'échange de chaleur.

(1) M. Bélot, T. Phan, F. Euzéat, J-L. Pierson, D. Teixeira G. Vinay, Q. Falcoz, A. Toutant, A. Wachs. *Turbulence, Heat and Mass Transfer 9. Brésil, 2018.*

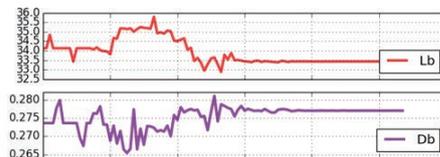
Contacts scientifiques :
 jean-lou.pierson@ifpen.fr
 guillaume.vinay@ifpen.fr

Optimisation du câble électrique d'une éolienne flottante

Les technologies d'éoliennes flottantes, comme celles codéveloppées par SBM^a et IFPEN, permettent de récupérer plus d'énergie avec de meilleures conditions de vents en mer. Des solutions d'optimisation sont actuellement recherchées pour minimiser les coûts liés au transport de la production électrique, en adaptant notamment la configuration^b des câbles, lesquels sont sollicités par les courants et les mouvements du flotteur (figure 1).



Paramètres (longueurs, diamètres) des câbles.



Évolution de deux paramètres au cours de l'optimisation avec l'algorithme SQA^d.

Calculer la réponse d'une éolienne flottante à ces sollicitations requiert l'utilisation de simulateurs numériques complexes mais qui ne fournissent pas le gradient de cette réponse par rapport à des paramètres d'entrée des modèles. De même, les publications sur le sujet font référence à des algorithmes d'optimisation sans gradient qui peuvent converger lentement ou sont difficiles à paramétrer.

La plateforme Atout^c d'IFPEN propose l'algorithme SQA^d qui est particulièrement efficace dans ce contexte⁽¹⁾. À partir d'un point initial, cet algorithme trouve rapidement une configuration optimale

du câble électrique (figure 2) respectant des limites en effort et en déplacement, pour des chargements extrêmes⁽²⁾.

Cette approche originale va permettre de rechercher plus efficacement et de proposer des configurations optimisées du câble électrique, dimensionnées pour des conditions variées de chargement. ■

a - SBM offshore - Floating wind turbine concept development
 b - Différents tronçons caractérisés par leur longueur, leur diamètre et leur flottabilité
 c - Advanced Tools for Optimization and Uncertainty Treatment
 d - Sequential Quadratic Approximation
 e - Avec des simulateurs de type « boîte noire » (dont on ne connaît que le résultat)

(1) H. Langouët, (2011), thèse Univ. Nice-Sophia Antipolis.

(2) Y. Poirrette, M. Guiton, G. Huwart, D. Sinoquet, J-M. Leroy (2017), OMAE 2017 61655.

Contacts scientifiques :
 yann.poirrette@ifpen.fr
 delphine.sinoquet@ifpen.fr
 martin.guiton@ifpen.fr
 guillaume.huwart@ifpen.fr

Design *In Silico* : cap sur les matériaux numériques !

Proposer des produits technologiques innovants passe souvent par des approches de simulation afin de doper notre capacité à évaluer des concepts originaux. C'est notamment vrai en mécanique des matériaux, où un enjeu essentiel consiste à comprendre et exploiter les relations entre la microstructure des matériaux et leurs propriétés d'usage.

Une action de recherche sur ce thème a été initiée par IFPEN concernant le comportement mécanique des matériaux poreux à base lamellaire, tels que certains supports de catalyseur (et certains polymères). L'objectif est de disposer d'un outil de calcul permettant au final de dimensionner et de développer de tels matériaux, structurés à plusieurs échelles (du nanomètre au dixième de millimètre) et capables de résister à des sollicitations mécaniques.

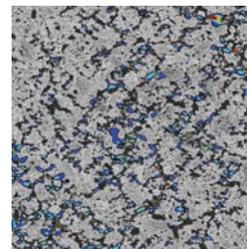
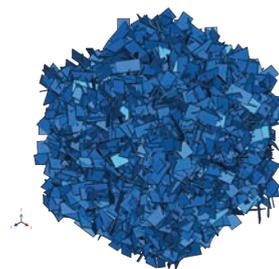
La démarche s'est appuyée sur les capacités actuelles en calcul de structures, pour les adapter au calcul de microstructures à empilements lamellaires ou granulaires⁽¹⁾. Un workflow multi-échelle a été mis en place en s'appuyant sur deux outils : la plateforme plug im^{1a} d'IFPEN pour la génération de microstructures, et le code de calcul commercial AbaqusTM, apte à

traiter efficacement les non-linéarités du comportement mécanique pour des gros systèmes. Les propriétés à l'échelle atomique qui alimentent le modèle ont été elles-mêmes estimées par des calculs de dynamique moléculaire.

Un enchaînement de méthodes numériques permet de franchir les différentes échelles de la structure du matériau. Cette démarche *In Silico*^b a été validée pour la prédiction de la partie linéaire du comportement (propriétés élastiques) des supports à base alumine.

Le travail porte désormais sur la partie non linéaire du comportement (plasticité et rupture), laquelle conditionne les caractéristiques d'intérêt de ces matériaux en service. Dans ce cadre, un cap a été récemment franchi pour la simulation de la plasticité par la méthode des Éléments finis, grâce à l'amélioration des méthodes de maillage local.

La prochaine étape sera d'introduire des propriétés de cohésion/rupture sous la forme d'une approche locale par zones cohésives^c, couplée à des techniques de modélisation moléculaire. ■



Modélisation d'un support de catalyseur à l'échelle mésoporeuse et macroporeuse.

a - <https://www.plugin.fr/>

b - Reposant sur des calculs complexes informatisés.

c - Méthode basée sur la mécanique de la rupture par fissuration et la mécanique de l'endommagement.

(1) V. Le Corre, N. Brusselle-Dupend, M. Moreaud, *Mechanics of Materials* 114 (2017) 161-171.

Contacts scientifiques :
vincent.le-corre@ifpen.fr
nadege.brusselle@ifpen.fr

Actualités

• **Didier Houssin, Président d'IFPEN, Khaled Bouabdallah, Président de l'Université de Lyon, et Jean-François Pinton, Président de l'ENS de Lyon et Directeur d'IDEXLYON**, ont signé la convention de la chaire ROAD4CAT (RatiOnAl Design for CATalysis). Cette première chaire IDEXLYON sera au cœur des innovations pour la transition énergétique grâce à une recherche à vocation environnementale et sociétale, liée notamment à l'amélioration de l'éco-efficacité des procédés catalytiques. Elle est attribuée à Pascal Raybaud, chercheur IFPEN en catalyse.

• **Didier Houssin, Président d'IFPEN, et Antoine Petit, Président-directeur général du CNRS**, ont signé le renouvellement pour cinq ans de l'accord-cadre entre IFPEN et le CNRS. Cet accord consolide une collaboration de longue date et réaffirme des objectifs scientifiques communs pour l'accomplissement de la transition énergétique.

• IFPEN s'est doté d'une référente sur l'intégrité scientifique s'appuyant sur la charte nationale de déontologie des métiers de la recherche.

Récompenses

• **Olga Vizika-Kawvadias, Directrice de la direction Géosciences**, a obtenu le prix Darcy 2018 de la Society of Core Analysts (SCA). Ce prix constitue la plus haute distinction de la SCA et est décerné chaque année à une personne considérée comme ayant apporté une contribution exceptionnelle dans le domaine de la pétrophysique.

• **Best Paper Award du Symposium « Riser and subsea systems »**, attribué lors du dernier congrès OMAE (Trondheim - Norvège) à un article de **Jean Kittel et Rémy Mingant**, co-signé par TechnipFMC et l'Institut de corrosion.

• **Sophie Bernadet, de la direction Catalyse et Séparation**, a reçu l'un des deux prix attribués aux meilleures communications orales lors de l'édition 2018 du Groupe d'étude en catalyse (GECat).

Visiteur scientifique

• **Edson Soares, Professeur associé de l'Universidade Federal do Espírito Santo (Brésil) et spécialiste en mécanique des fluides et caractérisation rhéologique des fluides complexes**, est accueilli à Lyon dans la direction Physico-chimie et Mécanique appliquées pour une visite scientifique d'un an.

Prochain événement scientifique

• **Conférence scientifique – Large-Eddy Simulation for Internal Combustion Engine Flows (LES4ICE) – 11 et 12 décembre 2018, Rueil-Malmaison – www.rs-les4ice.com**

Directeur de la publication : Marco De Michelis
Rédacteur en chef : Éric Heintzé
Comité éditorial : Xavier Longaygue, Laurent Forti, Catherine Ponsot-Jacquin
Conception graphique : Esquif
N° ISSN : 1957-3537

Contacts :

Direction scientifique : Tél. : +33 1 47 52 51 37 - Science@ifpen.fr

Presse : A.-L. de Marignan - Tél. : 01 47 52 62 07

1 et 4, avenue de Bois-Préau - 92852 Rueil-Malmaison Cedex - France

Science@ifpen Numéro 34 • Octobre 2018

www.ifpenergiesnouvelles.fr

@IFPENinnovation

