Rédigé le 20 octobre 2018

15 minutes de lecture

Actualités

Recherche fondamentale

Sciences de l'ingénieur | Mécanique des solides

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

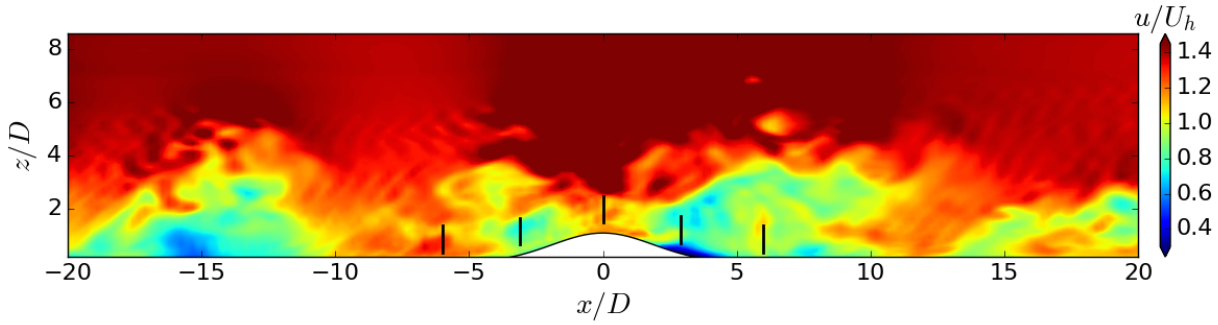
---

Voir le PDF de la lettre

LES BRÈVES

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].



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

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'aérologie. 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 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**

> NUMÉRO 34 DE SCIENCE@IFPEN

Parcs éoliens - un agencement plus efficace grâce à la modélisation

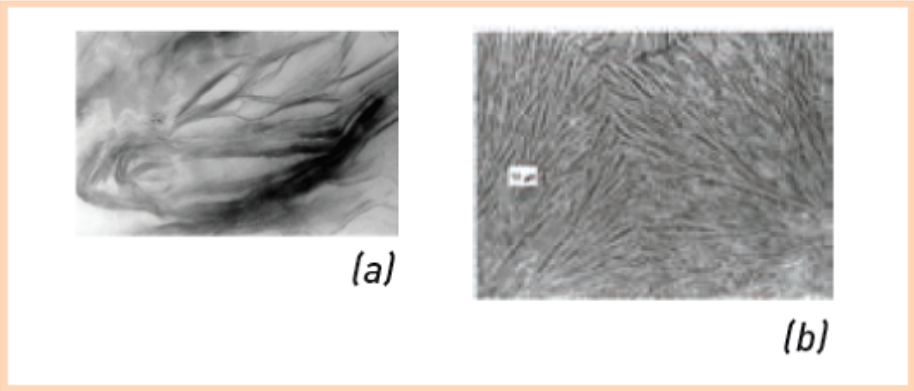
Dans le secteur de l'énergie, les **polymères semi-cristallins**[a] sont principalement utilisés au sein de **structures évoluant en milieu agressif**, afin de constituer des revêtements (barrière d'étanchéité, isolant thermique ou électrique). Ces matériaux possèdent une flexibilité intrinsèque mise 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.



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

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)].

[a] - *Comportant une phase cristalline et une phase amorphe.*

---

(1) *S. Maiza, X. Lefebvre, N. Brusselle, M-H. Klopffer, L. Cangémi, S. Castagnet, J.C. Grandidier. Soumis à Journal of Applied Polymer Science.*

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

> NUMÉRO 34 DE SCIENCE@IFPEN

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

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].

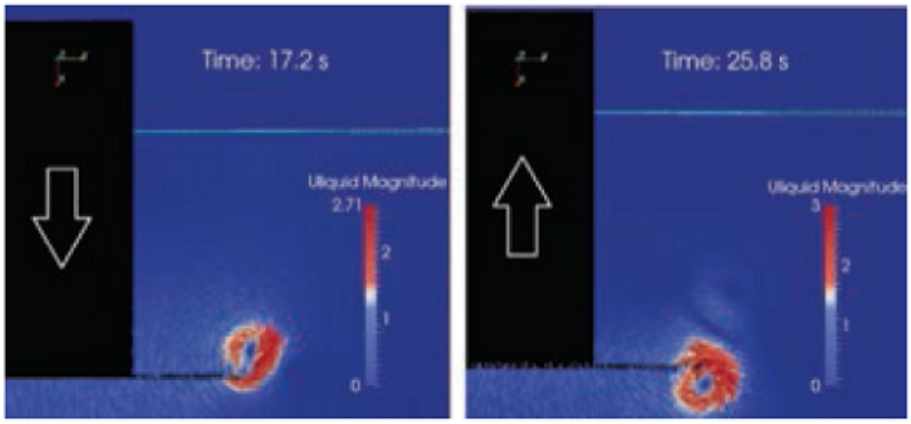
La conception et le dimensionnement de ces nouvelles structures reposent sur le **calcul des efforts générés par la houle** et des mouvements induits au niveau du flotteur.

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**[c] 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)].



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

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.

a - *Les Echos du 19 février 2018*
b - *Logiciel **DeepLines Wind** développé avec Principia*
c - *Computational Fluid Dynamics*
d - *Logiciel **OpenFOAM***

---

(1) *P. Bozonnet, A. Emery, CFD Simulations for the Design of Offshore Floating Wind Platforms Encompassing Heave Plates, 25th International Ocean and Polar Engineering Conference, 21-26 June, Kona, Hawaii, USA.* *https://www.onepetro.org/conference-paper/ISOPE-I-15-382*

(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**

> NUMÉRO 34 DE SCIENCE@IFPEN

Amélioration des modèles hydrodynamiques pour l’éolien flottant

Le **stockage de l'énergie**, enjeu majeur dans la transition énergétique, peut se faire sous différentes formes.

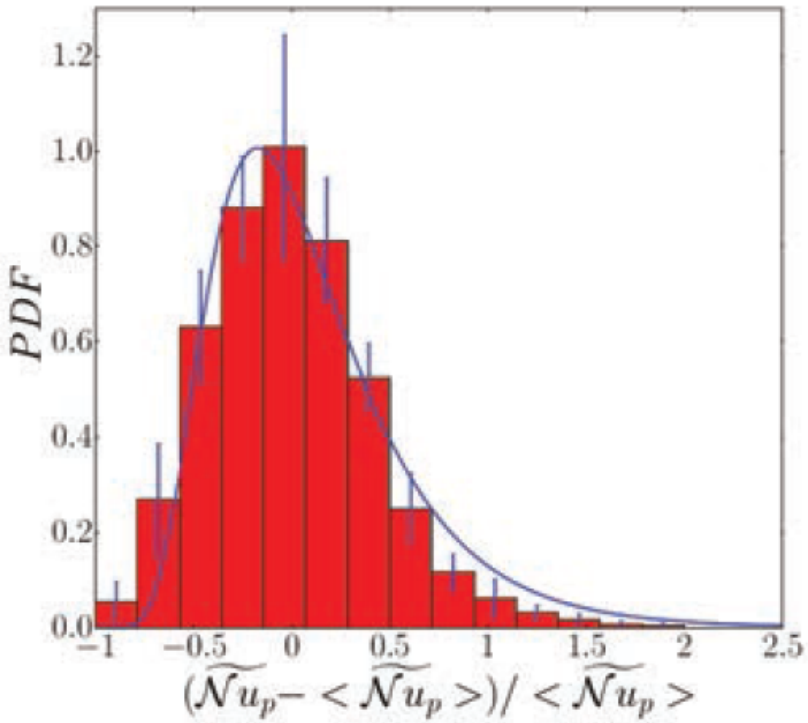
Pour le **stockage de chaleur**, une des solutions développées à IFPEN est basée sur un **lit fixe de particules**. Le **fluide caloporteur** s'écoule à travers ce lit pour stocker ou récupérer la chaleur dans les particules par transfert thermique(1).

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.



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

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.

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

---

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

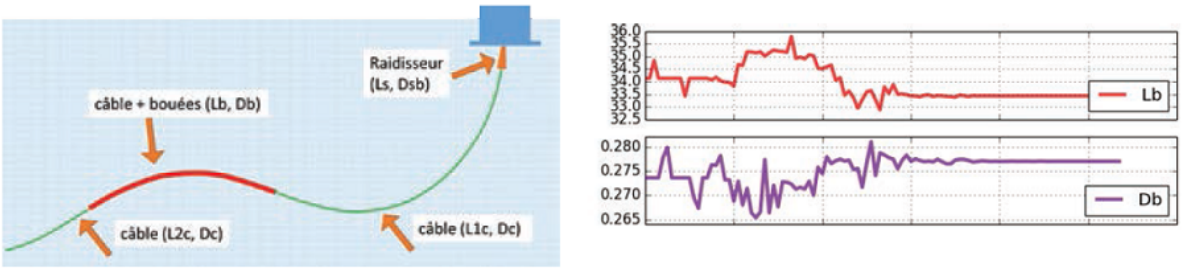
Contacts scientifiques : **jean-lou.pierson@ifpen.fr** - **Guillaume Vinay**

> NUMÉRO 34 DE SCIENCE@IFPEN

Chaleur en stock

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

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[e](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 - *Nombre adimensionnel qui traduit l'intensité de l'échange de chaleur.*
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), Optimisation sans dérivées sous contraintes : deux applications industrielles en ingénierie de réservoir et en calibration des moteurs, thèse Univ. Nice-Sophia Antipolis*. HAL Id : tel-00671987, version 1*

(2) *Y. Poirette, M. Guiton, G. Huwart, D. Sinoquet, J-M. Leroy (2017), An Optimization Method for the Configuration of Inter Array Cables for Floating Offshore Wind Farm, OMAE 2017 61655. Doi: 10.1115/OMAE2017-61655.*

Contacts scientifiques : **yann.poirette@ifpen.fr** - **Delphine Sinoquet** - **martin.guiton@ifpen.fr** - **guillaume.huwart@ifpen.fr**

> NUMÉRO 34 DE SCIENCE@IFPEN

Optimisation du câble électrique d’une éolienne flottante

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**.

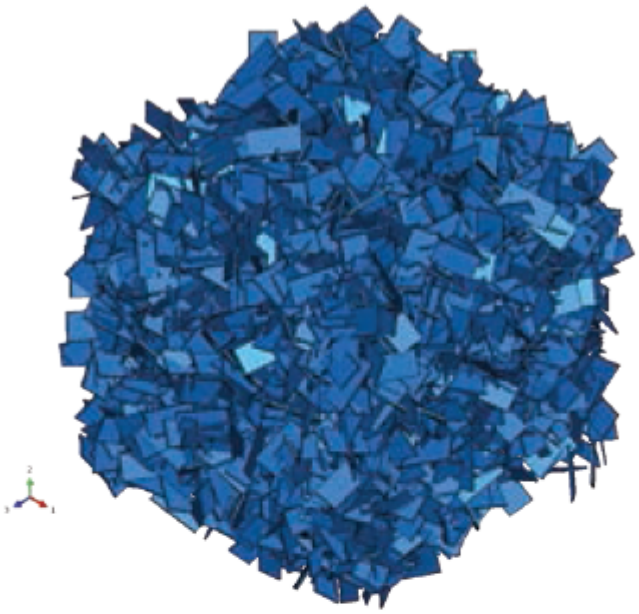
Une action de recherche sur ce thème a été initiée par IFPEN concernant le **comportement mécanique des matériaux poreux à base lamellaire**, tels que certains supports de catalyseur (et certains polymères). L'objectif est de disposer d'un outil de calcul permettant au final de dimensionner et de développer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

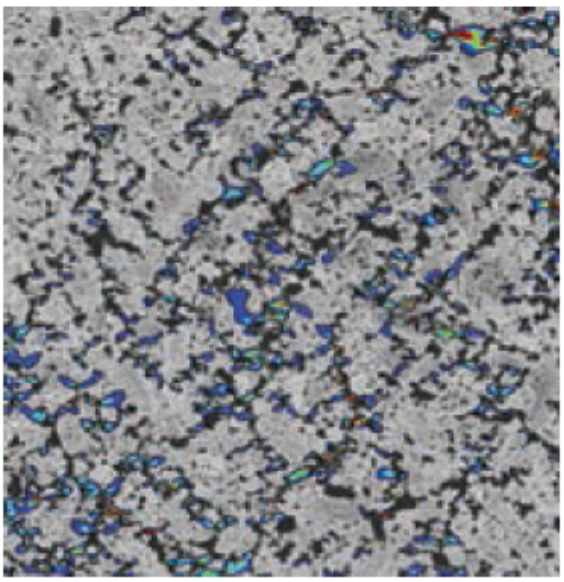
La démarche s'est appuyée sur les capacités actuelles en calcul de structures, pour les adapter au **calcul de microstructures à empilements lamellaires ou granulaires**(1). Un *workflow* multi-échelle a été mis en place en s'appuyant sur deux outils : la **plateforme *plug im!***[a]d'IFPEN pour la génération de microstructures, et le **code de calcul commercial *Abaqus*™**, 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.plugim.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, Numerical modeling of the effective ductile damage of macroporous alumina, Mechanics of Materials 114 (2017) 161–171. DOI: 10.1016/j.mechmat.2017.08.002*

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

> NUMÉRO 34 DE SCIENCE@IFPEN

Design In Silico : cap sur les matériaux numériques !

Numéro 34 de Science@ifpen - Mécanique appliquée
20 octobre 2018

Lien vers la page web :