



# Science@ifpen

N°14 - Septembre 2013

## Ô Cire, écoule toi !



Comprendre les phénomènes physiques régissant des procédés industriels et estimer précisément la durée

de vie de produits technologiques dans leur environnement, sont deux sujets d'investigation majeure de la direction Mécanique appliquée. Dans ces domaines, la qualité de nos recherches, tant sur le plan académique que vis-à-vis de la capacité de valorisation industrielle, est mondialement reconnue.

Ainsi, IFPEN se positionne parmi les cinq premiers organismes mondiaux en termes de publications scientifiques dans les domaines de la simulation des écoulements à phase dispersée ou celui du comportement mécanique des matériaux polymères. Dans le domaine des énergies marines renouvelables, IFPEN se situe parmi les trois premiers déposants de brevets concernant les performances aérodynamiques et les supports flottants adaptés aux éoliennes offshore. Ce numéro illustre six domaines significatifs que les compétences de la direction en mécanique des fluides et des solides permettent d'adresser, allant des aspects théoriques au design d'équipements technologiques complexes.

Bonne lecture,

Éric Heintzé,  
Directeur de la direction Mécanique appliquée

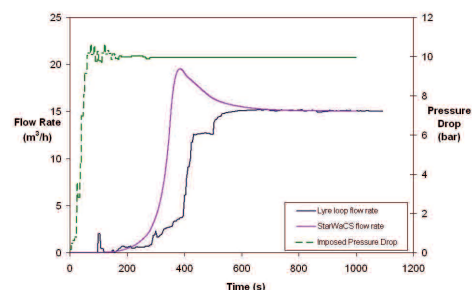
Les huiles cireuses ou paraffiniques ont un comportement complexe qui peut engendrer des problèmes de transport dans les conduites pétrolières. En dessous d'une certaine température, un réseau de paraffines cristallisées apparaît et forme un gel hétérogène dont le comportement rhéologique est viscoplastique, thixotrope et marqué par une faible compressibilité. Ce phénomène apparaît notamment lors d'un arrêt de production, et le principal problème pour les opérateurs pétroliers est alors de déterminer la pression nécessaire pour redémarrer l'écoulement.

Ainsi, IFPEN a développé le modèle numérique StarWaCS qui permet de simuler la reprise d'écoulement d'un brut paraffinique. Cependant, pour prédire ce processus, il est essentiel de connaître la structure du brut paraffinique gélifié, qui dépend fortement de son histoire thermique et mécanique.

Pour ce faire, la méthodologie Cold Start a été développée et brevetée. Son objectif est de déterminer l'état du gel (viscosité, résistance mécanique, compressibilité, etc.) à l'issue du processus de refroidissement. À partir d'essais rhéométriques et de calculs thermiques, la structure du brut paraffinique gélifié est ainsi évaluée et fournie comme donnée initiale au simulateur d'écoulement StarWaCS.

Celui-ci est alors utilisé pour déterminer la pression de redémarrage. La méthodologie Cold Start et l'outil StarWaCS ont été validés en utilisant des données issues d'essais réalisés dans une boucle expérimentale de 140 m (boucle Lyre).

Les prochains développements se concentreront sur la modélisation du processus de formation du gel et l'impact de la pression sur sa structure. ■



Évolution temporelle du débit volumique mesuré dans la boucle Lyre et calculé avec StarWaCS au cours du redémarrage.

A. Wachs, G. Vinay, I. Frigaard, A 1.5D numerical model for the start-up of weakly compressible flow of a viscoplastic and thixotropic fluid in pipelines, *JNNFM*, 2009, 159.  
DOI : 10.1016/j.jnnfm.2009.02.002

G. Vinay, I. Hénaut, C. Cassar, Restart of waxy crude oils: a new approach to determine the initial gel structure, 4<sup>th</sup> Conference on Viscoplastic Fluids, Brésil, 2011.

Contact scientifique :  
guillaume.vinay@ifpen.fr

IFP Energies nouvelles est un organisme public de recherche, d'innovation et de formation dont la mission est de développer des technologies performantes, économiques, propres et durables dans les domaines de l'énergie, du transport et de l'environnement.



# Les fonds marins ont la fibre composite

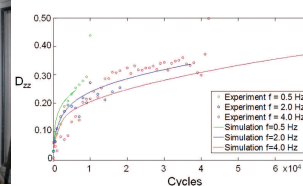
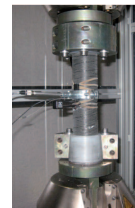
En exploitation pétrolière offshore, le riser de forage ou de production fait la liaison entre le puits et le support flottant. Par grands et ultra grands fonds, le poids du riser devient très important et son allègement est un enjeu fondamental. Une des voies envisagées par IFPEN, en collaboration avec les industriels du secteur, est l'utilisation de matériaux composites dans la fabrication de ces conduites.

L'introduction de cette technologie en mer reste conditionnée à la levée de plusieurs verrous, parmi lesquels la prédiction de l'évolution dans le temps des propriétés mécaniques des matériaux, leur tenue à la fatigue, et plus généralement le calcul de la durée de vie des structures composites. Aujourd'hui, faute d'outils de dimensionnement simples, les structures composites sont souvent réalisées avec des coefficients de sécurité élevés pour préserver leur

intégrité tout au long de leur vie, ce qui rend in fine cette technologie encore économiquement peu viable.

IFPEN a accru ses efforts pour mieux appréhender cette problématique. Un modèle d'endommagement de structures tubulaires composites a ainsi été développé. Basé sur les similitudes de comportement entre l'accumulation de l'endommagement et la visco-élasticité des matériaux composites, ce modèle permet de prédire l'évolution du dommage et donc la durée de vie d'une structure soumise à un chargement de fatigue ou de fluage.

Ce travail est une contribution importante pour l'utilisation de structures composites soumises à des sollicitations mécaniques répétées. Il ne considère pas les contraintes liées à l'environnement marin, dont l'influence peut être cruciale. C'est le prochain développement à



Comparaison essai - simulation de l'endommagement en fatigue d'un tube composite.

engager pour relever le défi de l'ultra grand fond en proposant des structures composites optimisées. ■

Y. Poirette et al., Field Testing of Hybrid Choke and Kill Lines, OTC Proceedings, 2009, Houston, Texas. DOI : 10.4043/20077-MS

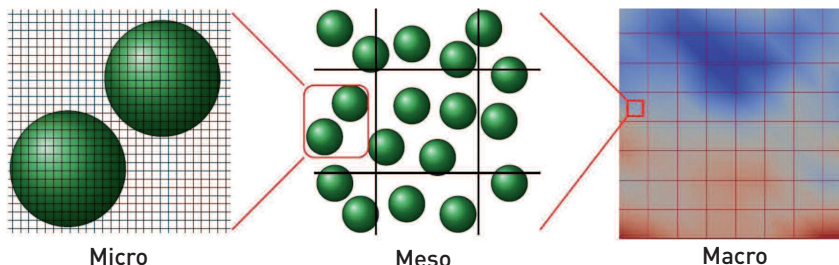
P. Treasurer et al., Characterisation and analysis of carbon fibre/epoxy composite tubes, ICCM proceedings, 2009, Edinburgh, UK.

Contact scientifique :  
yann.poirette@ifpen.fr

## Particule : Quo vadis ?

Qu'arrive-t-il à une particule solide dans un écoulement fluide ? Quelques idées intuitives se révèlent exactes : si elle est petite, elle est transportée à la vitesse de l'écoulement ; si elle est seule, elle perturbe peu l'écoulement ; si sa température interne est égale à celle de l'écoulement, elle n'échange pas de chaleur avec ce dernier... Mais quid des grandes particules, nombreuses, et dont la température est différente du fluide ? La réponse est plus délicate.

En fait, les particules et le fluide échangent de la quantité de mouvement et de la chaleur. Ces échanges gouvernent la dynamique de l'écoulement particulaire, notamment la trajectoire des particules. À ce jour, ces écoulements fluide/particules ne sont que partiellement compris, bien que présents dans de nombreux procédés industriels (réacteurs catalytiques) et phénomènes naturels d'intérêt pour le monde pétrolier (transport sédimentaire par exemple). C'est pourquoi IFPEN s'est impliqué dans la modélisation numérique de ces



Vision multi-échelle des écoulements particulaires.

écoulements et a développé son propre code de calcul PeliGRIFF (*Parallel Efficient Library for GRains In Fluid Flow*). Ce code intègre des modèles physiques à différentes échelles de description : micro, meso et macro, sachant toutefois que plus l'échelle est petite, plus les moyens de calcul nécessaires sont importants (jusqu'à plusieurs milliards d'inconnues et plusieurs milliers de processeurs). Les dernières évolutions du code intègrent un modèle fluide/particules à l'échelle meso, un modèle de cinétique chimique à l'échelle micro (pour les aspects réactifs) et des schémas numériques en espace d'ordre 2 (précision accrue).

Les prochaines évolutions porteront principalement sur la capacité à traiter des particules de forme non convexe, et le couplage avec des outils de simulation à l'échelle nanométrique des réactions chimiques (dynamique moléculaire, DFT, Ab Initio). ■

A. Wachs, Rising of 3D catalyst particles in a natural convection dominated flow by a parallel DNS method, Computers & Chemical Engineering, 2011, 35(11), 2169-2185. DOI : 10.1016/j.compchemeng.2011.02.013

www.peligriff.com



Contact scientifique :  
anthony.wachs@ifpen.fr

## Des plastiques pas si fantasques

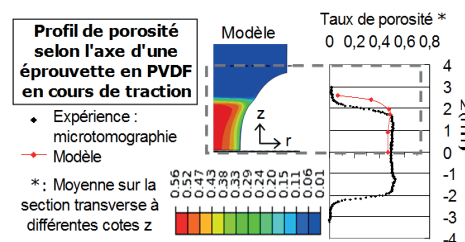
Les polymères semi-cristallins voient leur usage s'étendre dans des applications industrielles de plus en plus sévères. Par conséquent, ces matériaux doivent pouvoir supporter des états de contrainte sévères (pression, température) dans un environnement souvent agressif (fluide, gaz). En particulier, le processus de cavitation, qui peut être observé dans certaines configurations de sollicitation mécanique, est une source de préoccupation majeure pour l'industrie pétrolière.

Afin de discriminer la pertinence de concepts technologiques comportant des polymères semi-cristallins et de prédire leur durée de vie, IFPEN développe des lois de comportement mécanique spécifiques pour effectuer des analyses de dimensionnement en mécanique des structures par la Méthode des Éléments Finis.

L'enjeu est de pouvoir doter l'industrie d'une démarche intégrée (*virtual design*) de prédiction du comportement

mécanique des produits technologiques utilisant ces matériaux. Au sein d'IFPEN, une modélisation originale a été proposée pour ce type de matériaux : le modèle VIScoPOL. Celui-ci permet d'aborder les effets de pression, de viscosité, de chargement mécanique tridimensionnel, ainsi que les mécanismes de ruine qui peuvent en découler. La confiance dans les modèles de comportement est primordiale pour le *virtual design*. C'est pourquoi un travail d'investigation et de validation a été mené vis-à-vis du processus de cavitation sur la base d'analyses microtomographiques in situ pour mesurer la porosité.

Au-delà des aspects purement mécaniques inhérents à ces matériaux viscoplastiques, des effets de couplage entre transferts de masse (perte d'adjuvants, sorption et désorption de gaz) et comportement mécanique peuvent être à l'origine de phénomènes d'endommagement. L'étude et la modélisation de ces couplages font



désormais partie de travaux conduits par IFPEN. ■

*N. Brusselle-Dupend, L. Cangémi, Mechanics of Materials, 2008, 40, 743-760.  
DOI : 10.1016/j.mechmat.2008.03.011*

*N. Brusselle-Dupend, E. Rosenberg, J. Adrien, Materials Science and Engineering A, 2011, 530, 36-50.  
DOI : 10.1016/j.msea.2011.09.009*

*C. Baudet, J.-C. Granddier, L. Cangémi, Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 2011, 59, 1909-1926.  
DOI : 10.1016/j.jmps.2011.04.010*

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

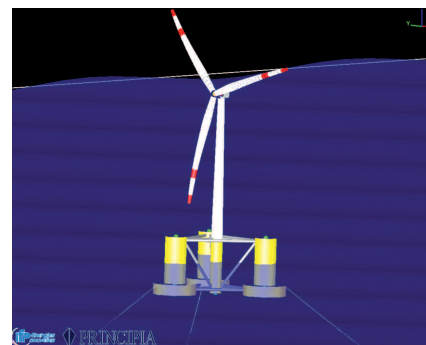
## Quand les éoliennes prennent le large !

Au-delà d'une profondeur d'eau de 50 m, l'éolien offshore à fondation fixe n'apparaît plus économiquement viable. Aussi, de nouvelles solutions sont actuellement explorées avec notamment le développement de supports flottants. Dans cette perspective, IFPEN travaille au développement d'un support flottant permettant l'installation d'une éolienne de plusieurs mégawatts au large des côtes françaises.

L'enjeu est de proposer une solution présentant un coût du kWh compétitif. Il s'agit, d'une part, de concevoir un support flottant et un système d'amarrage capables de maintenir l'éolienne dans des conditions de fonctionnement optimales, quelles que soient les conditions de mer, de vent et de courant susceptibles d'être rencontrées annuellement. D'autre part, l'ensemble du système doit être également capable de résister aux conditions de mer extrêmes quinquen-

nales. Les principales difficultés de conception tiennent au fait que de nombreux phénomènes physiques interviennent de manière interactive. De forts couplages apparaissent ainsi entre la turbine, son système de contrôle, le support flottant et le système d'amarrage mêlant à la fois de l'aérodynamique, de l'hydrodynamique et de la mécanique. Pour répondre à ces contraintes, IFPEN a développé, en collaboration avec la société Principia, un outil numérique de design permettant de prendre en compte l'ensemble des phénomènes physiques mis en jeu. Cet outil a permis d'étudier diverses configurations de support flottant.

Ce travail a fait émerger un concept innovant de support aujourd'hui breveté, qui est actuellement étudié de manière plus approfondie en le soumettant à différentes conditions de fonctionnement pour en optimiser les performances. ■



Exemple de plateforme étudiée pour l'éolien offshore flottant.

*T. Perdrizet, J.-C. Gilloteaux et al., Fully coupled floating wind turbine simulator based on nonlinear finite element method - part II: validation results, Proc. OMAE 2013.*

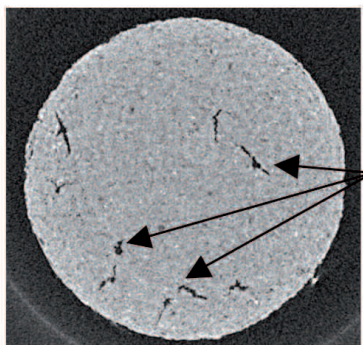
**Contact scientifique :**  
jean-christophe.gilloteaux@ifpen.fr

# Les supports de catalyseurs sous pression

Les besoins en carburants raffinés à très bas niveaux de soufre et de métaux lourds conduisent à toujours améliorer les performances des catalyseurs d'hydrotraitement. Ceux-ci sont constitués d'une phase active dispersée sur un support poreux en alumine gamma. L'optimisation de la porosité du support est une des clés de la performance.

Toutefois, cette évolution se fait au détriment de la résistance mécanique. Or, les catalyseurs, sous forme de grains extrudés de quelques millimètres, sont soumis à de fortes sollicitations mécaniques lors de leur transport et de leur utilisation au sein de réacteurs de plusieurs mètres de hauteur. Une tenue mécanique trop faible peut provoquer un endommagement des grains et une formation de fragments et de fines particules, néfastes au fonctionnement de l'unité industrielle.

L'approche adoptée à IFPEN, en collaboration avec le laboratoire MATEIS (INSA de Lyon, CNRS) consiste à déterminer les modes de ruines pour les différents types



**Défauts produits lors de la mise en forme par extrusion**

Reconstruction par tomographie X de la coupe transverse d'un support de catalyseur.

de sollicitation de supports à porosité très variable, et à identifier les défauts de microstructure à l'origine des ruptures. La méthode mise en place est basée sur une combinaison d'essais mécaniques, couplée à une observation systématique des faciès de rupture au microscope électronique à balayage et à une recherche des défauts critiques par microtomographie aux rayons X.

L'étude en cours a permis de mettre en évidence l'influence, pour la tenue mécanique à l'écrasement, de défauts d'extrusion micrométriques, particulièrement pour les extrudés les plus

poreux. Afin d'améliorer la résistance mécanique des supports, deux voies sont envisagées : l'amélioration de la résistance à la propagation des fissures ou la minimisation des défauts de fabrication. ■

D. Staub, S. Meille, J. Chevalier, V. Le Corre, Proceedings of the 13<sup>th</sup> European Inter-Regional Conference on Ceramics (CIEC 13), 2012, Barcelona.

**Contacts scientifiques :**  
vincent.le-corre@ifpen.fr  
loic.rouleau@ifpen.fr

## Nominations

• **Olivier Appert**, Président d'IFPEN, a été nommé membre du Conseil d'administration d'EDF en qualité de représentant de l'État, en remplacement de Yannick d'Escatha (juin 2013). Cette nomination témoigne du rayonnement d'IFPEN dans le monde de l'énergie et est une reconnaissance de l'expertise de ses personnels dans ce domaine.

• **Pascal Barthélemy**, Directeur général adjoint d'IFPEN, a été nommé Président du comité Innovation du comité stratégique de filière Chimie-Matériaux (juin 2013). Cette nomination va permettre à IFPEN de contribuer aux réflexions et travaux du comité en apportant sa vision des enjeux du secteur, mais aussi son expertise en matière de recherche et d'innovation.

• **Olga Vizika-Kavvadias**, Directeur Géosciences d'IFPEN, a été nommée au Conseil d'administration de l'École nationale supérieure d'Électricité et de Mécanique (ENSEM) de Nancy (juin 2013).

## Prochains événements scientifiques

• Les Rencontres scientifiques d'IFP Energies nouvelles – **Viscoplastic Fluids: From Theory to Application** – 18-21 novembre 2013, IFPEN Rueil-Malmaison.

• **14<sup>e</sup> congrès SFGP 2013** – 8-10 octobre 2013, Cité - Centre de congrès de Lyon.

• Les Rencontres scientifiques d'IFP Energies nouvelles – **Creating the next generation laboratory to develop innovative materials and additives for energy (NEXTLAB 2014)** – 2-4 avril 2014, IFPEN Rueil-Malmaison.

## Ouvrages

• Fabrice Bertoncini, Marion Courtiade-Tholance, Didier Thiébaud – **"Gas Chromatography and 2D-Gas Chromatography for Petroleum Industry – The Race for Selectivity"** – Éditions Technip. ISBN : 9782710809920

• Hervé Toulhoat, Pascal Raybaud – **"Catalysis by Transition Metal Sulfides – From Molecular Theory to Industrial Application"** – Éditions Technip. ISBN : 9782710809913

• François Badin – **"Véhicules hybrides – Des composants au système"** – Éditions Technip. ISBN : 9782710809869

**Directeur de la publication :** Marco De Michelis  
**Rédacteur en chef :** Sophie Jullian  
**Comité éditorial :** Xavier Montagne, Xavier Longaygue, Laurent Forti  
**Conception graphique :** Esquif  
N° ISSN : 1957-3537

Pour prendre contact avec IFP Energies nouvelles ou pour recevoir Science@ifpen :

Direction des Relations institutionnelles et de la Communication

Tél. : +33 1 47 52 59 00 - Fax : +33 1 47 52 70 96 - Science@ifpen.fr

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

Contact presse : A.-L. de Marignan - Tél. : 01 47 52 62 07 – Contact institutionnel : K. Ragli - Tél. : 01 47 52 58 75

Science@ifpen Numéro 14 • Septembre 2013

www.ifpennergiesnouvelles.fr

