

# Science@ifpen

N° 30 - Octobre 2017

**NUMÉRO SPÉCIAL**  
Commande et optimisation  
des systèmes complexes



*On a coutume de dire que l'augmentation continue de la puissance des ordinateurs, conjuguée au progrès des algorithmes*

*mathématiques, a permis un développement sans précédent de la simulation numérique de phénomènes physiques complexes. Mais ces capacités informatiques accrues ont aussi révolutionné notre approche des systèmes complexes en permettant de les optimiser, de les commander et donc de mieux agir sur le fonctionnement ou le pilotage d'équipements.*

*Ce numéro, consacré à l'optimisation et la commande des systèmes complexes, dresse un panorama non exhaustif des applications, par IFPEN, de l'optimisation et du contrôle optimal dans le domaine de l'énergie : éoliennes offshore flottantes, exploitation des réserves pétrolières, procédés en génie chimique, fonctionnement des moteurs et récupération d'énergie.*

*Enfin, n'oublions pas que les techniques d'optimisation sont cruciales pour traiter les grandes masses de données issues de mesures expérimentales, de calculs numériques ou de traitements informatiques. C'est donc une ouverture vers un autre thème de la recherche fondamentale d'IFPEN : le traitement optimal de ces flux massifs de données.*

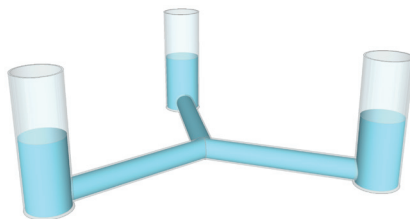
Bonne lecture,

Grégoire Allaire,  
Président du Conseil scientifique d'IFPEN

## Contrôle des plateformes éoliennes offshore : être actif réduit la fatigue

La tenue en fatigue des éoliennes offshore flottantes est fortement impactée par les sollicitations de la houle sur les plateformes qui les supportent. Des systèmes d'amortissement passifs ou actifs, si possible peu coûteux, sont donc recherchés pour atténuer ces effets.

Les dispositifs existants tels que des colonnes en forme de tubes en U, qui reposent sur le principe d'un transfert dynamique de réserves d'eau (agissant comme des masses en mouvement), sont passifs et peu adaptés à la direction changeante de la houle.

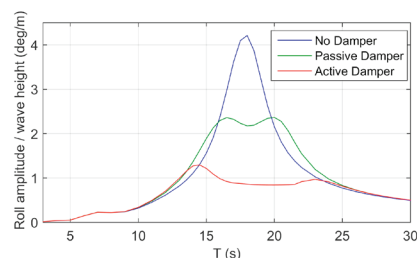


Pour surmonter ces difficultés, les chercheurs d'IFPEN ont imaginé un système d'amortissement multi-directionnel, disposé en forme d'étoile, d'abord modélisé, et pour lequel une loi de contrôle actif a été proposée<sup>[1-3]</sup>. Ce contrôle passe par le pilotage en continu de la taille des restrictions (fixes dans la version passive) à l'intérieur des conduites, ce qui permet de limiter le flux naturel de l'eau entre les réservoirs.

Le système proposé permet d'atténuer les effets de la houle quelle que soit sa

direction. Dans la version active, la loi de contrôle mise au point permet d'atteindre des performances très supérieures à la version passive (figure).

Des variantes de ce système peuvent encore conduire à des améliorations, tant au niveau de la conception des plateformes que du contrôle en service. On pourra, par exemple, ajouter et piloter des liens entre les colonnes d'air ou optimiser le réglage pour un site de production donné en fonction de ses caractéristiques en vent et houle. ■



Atténuation des mouvements avec les systèmes d'amortissement (passifs et actifs) pour une excitation par une houle monochromatique.

[1] O. Lepreux & C. Coudurier, Brevet 3048409, 2017

[2] C. Coudurier, O. Lepreux, N. Petit, Proc. of 10th IFAC Conference on Manoeuvring and Control of Marine Craft, MCMC, 2015

[3] C. Coudurier, O. Lepreux, N. Petit, submitted to Journal of Ocean Engineering

Contact scientifique :  
olivier.lepreux@ifpen.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.

# Chaleur des gaz d'échappement : récupération optimale grâce au contrôle/commande

La récupération de la chaleur des gaz d'échappement en utilisant le cycle thermodynamique de Rankine<sup>a</sup> est l'une des voies envisagées pour réduire la consommation des moteurs thermiques.

Bien maîtrisée pour des applications stationnaires, telles que les centrales thermiques, cette technologie devient très complexe pour les transports, en raison de conditions de fonctionnement éminemment transitoires, ce qui rend indispensable un système de contrôle/commande efficace.

Trois cas d'application ont été considérés par les équipes d'IFPEN : les véhicules légers, les camions poids lourds et les trains à propulsion hybride Diesel-électrique<sup>b</sup>. La conception, pour chacun d'eux, d'un système Rankine pilote a nécessité de nouveaux développements en automatique, basés sur des modèles :

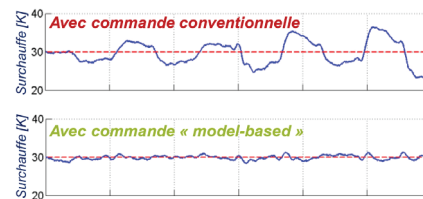
- pour la régulation de la surchauffe en sortie d'évaporateur (figure) : une nouvelle loi de commande non linéaire,

permettant l'asservissement de la température et de la pression, a été proposée ;

- pour la supervision énergétique du système Rankine : une démarche d'optimisation dynamique, permettant de calculer les consignes de la commande en fonction des conditions de roulage, a été mise en œuvre, afin de maximiser l'efficacité énergétique.

La validation expérimentale du système a montré qu'il pouvait être maintenu dans des conditions permettant une récupération continue d'énergie, même sur des cycles routiers très dynamiques<sup>(1)</sup>. On a ainsi pu vérifier que le gain énergétique apporté par l'optimisation dynamique en temps réel était significatif par rapport à l'existant (+ 7%)<sup>(2)</sup>.

Ces travaux pionniers font aujourd'hui référence dans le domaine de la commande des systèmes Rankine. ■



Régulation de surchauffe, sortie évaporateur.

- a - Cycle adiabatique permettant de transformer la chaleur en travail mécanique.  
b - Ces derniers ont fait l'objet d'un co-développement avec la société Enogia.

[1] J. Peralez, M. Nadri, P. Dufour, P. Tona, A. Sciarretta. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2017, 25(3), pp. 952 - 965. DOI : 10.1109/TCST.2016.2574760

[2] J. Peralez, P. Tona, M. Nadri, P. Dufour, A. Sciarretta. *Journal of Process Control*, vol. 33, 2015, pp. 1-13, ISSN 0959-1524. DOI : 10.1016/j.procont.2015.03.009

Contact scientifique :  
paolino.tona@ifpen.fr

## Des placements optimisés pour des ressources qui durent

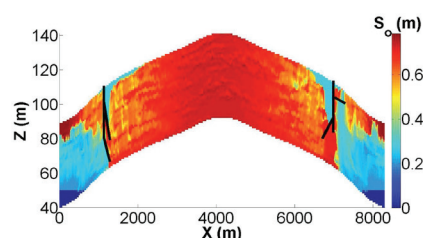
Face à la décroissance des réserves d'hydrocarbures, l'augmentation de la productivité de chaque champ pétrolier devient un enjeu technologique de premier ordre. Ainsi, le positionnement et la trajectoire des puits sont des facteurs critiques et l'industrie cherche à se doter de méthodes avancées pour en optimiser le placement lors du développement d'un champ.

Cette phase de développement s'appuie sur la simulation de l'écoulement des fluides dans le réservoir pour déterminer la position, la trajectoire et le type des puits. L'optimisation consiste à maximiser une fonction objectif NPV (*Net Present Value*) combinant les gains de production du champ et les coûts du forage, le tout calculé à partir des sorties du simulateur pour chaque puits (productions d'eau, d'huile et de gaz). Le caractère mixte des variables d'optimisation (continues, entières, binaires), les non-linéarités de la fonction NPV et le coût de calcul associé compliquent fortement la résolution de ce problème.

IFPEN a donc proposé une méthodologie en deux étapes qui consiste à<sup>(1,2)</sup> :

- déterminer seulement position et type des puits verticaux, réduisant ainsi le nombre de variables. Ceci permet de traiter un problème non linéaire mixte (à variables entières et continues) à l'aide d'une méthode globale de recherche directe, et sur la base de simulations numériques ;
- optimiser les trajectoires des branches qui partent des puits verticaux, en utilisant un modèle analytique simplifié.

Cette approche d'optimisation séquentielle autorise une résolution par des adaptations de méthodes classiques MINLP (*Mixed Integer Non Linear Programming*). Elle peut aussi s'envisager pour les dates de mise en production ou de fermeture d'un puits, ou bien la mise en place de stratégies adaptées lorsque sa rentabilité baisse. ■



Exemple 2D d'un cas optimisé de trajectoires pour 2 puits producteurs (en noir).

[1] C. Lizon, 2016, *Mixed nonlinear optimization for integer and real variables: application to well location problem in reservoir engineering*, thèse de doctorat, École polytechnique.

[2] C. Lizon, C. D'Ambrosio, M. Le Ravalec, L. Liberti, and D. Sinoquet, *Proc. 14th European Conference on the Mathematics of Oil Recovery (ECMOR)*, 2014.

Contact scientifique :  
delphine.sinoquet@ifpen.fr

# Conception optimisée des procédés : être plus efficace, même avec de l'éthanol

La conception optimisée des procédés est une démarche complexe mais prometteuse au regard des bénéfices attendus sur l'efficacité des systèmes industriels et sur leurs performances en service. Ceci a fait l'objet de travaux de thèse<sup>(1)</sup> réalisés en collaboration avec l'École polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL) sur un exemple lié aux carburants alternatifs : la production de bioéthanol à partir de la canne à sucre et de ses feuilles, associée à de la cogénération. L'objectif était de diminuer la consommation d'énergie de l'unité, tout en maximisant l'exportation de l'énergie excédentaire<sup>(1-2)</sup>.

La stratégie d'optimisation a consisté à considérer l'intégralité du procédé, c'est-à-dire simultanément : l'enchaînement des équipements (réacteurs, échangeurs, colonnes à distiller), le réseau d'utilités (vapeur et électricité) et les conditions opératoires (températures, pressions, etc.). La mise en œuvre de cette stratégie a nécessité de modéliser et de simuler entièrement le procédé et la production des utilités. Quelques chiffres illustrent la complexité du problème : 28 variables d'optimisation des équipements, 50 flux matière à intégrer thermiquement et 75 équipements.

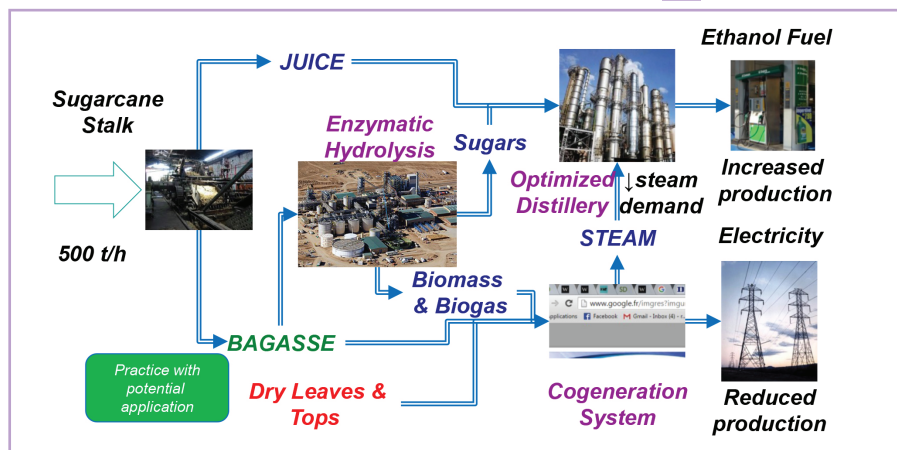


Schéma d'un procédé de production d'éthanol et de cogénération de chaleur/électricité.

L'optimisation réalisée étant multi-objectif, elle a permis de restituer toutes les solutions de compromis économique et énergétique liées à une ou plusieurs des fonctions « objectifs » définie(s) par l'utilisateur.

Ces travaux ont montré qu'il était possible de réaliser un gain de 7% sur l'efficacité énergétique globale et une augmentation de la production électrique de 20%<sup>(1)</sup>, tout en maintenant inchangée la production d'éthanol. ■

[1] R. Bechara, *Methodology for the multi-objective optimization of processes: application to ethanol and power production from sugarcane*, thèse de doctorat, université Lyon 1 (2015)

[2] R. Bechara, A. Gomez, V. Saint-Antonin, J.-M. Schweitzer, F. Maréchal, *Energy* 117 (2016). DOI : 10.1016/j.energy.2016.07.018

Contact scientifique :  
adrien.gomez@ifpen.fr

## Éolien flottant : gagner en fiabilité dans « l'océan des possibles »

La conception optimale des structures mécaniques est de fait limitée par la connaissance imparfaite des conditions d'environnement auxquelles elles sont soumises en service. La prise en compte systématique des incertitudes qui en résultent conduit actuellement à l'utilisation intensive de simulateurs complexes. C'est pour répondre à cette problématique qu'IFPEN conçoit des ancrages et des flotteurs d'éoliennes, qui concilient une robustesse en service avec un coût permettant une mise en production à grande échelle.

L'optimisation *via* des simulateurs étant coûteuse en temps de calcul, on cherche à mener une exploration « économe » des possibles, notamment en matière de conditions environnementales. De plus, la relative rareté des défaillances impose que les cas simulés soient suffisamment nombreux pour espérer observer de tels phénomènes et adapter en conséquence la conception de la structure.

Ces deux difficultés ont été traitées respectivement :

- par des techniques de réduction de dimension, pour les processus aléatoires modélisant les conditions environnementales,
- et par le recours à des méthodes de simulation de Monte-Carlo accélérées, pour réduire le nombre de scénarios nécessaire à l'estimation de la probabilité de défaillance<sup>(1)</sup>.

Par ailleurs, les contraintes de l'optimisation étant des fonctions de probabilité de défaillance, et la méthode de résolution employée nécessitant le calcul de leur dérivée, un travail supplémentaire a été mené en ce sens<sup>(2)</sup>.

Enfin toujours dans le but de réduire les temps de calcul, une alternative reposant sur des approximations des contraintes probabilistes, et basées sur la théorie des valeurs extrêmes, a été appliquée au dimensionnement d'un ancrage d'éolienne offshore, résistant à la fatigue.



Par la mise en place de moyens de calculs, d'algorithmes et de méthodologies nouvelles, IFPEN contribue à l'amélioration des outils de conception pour les supports éoliens flottants, en étroite collaboration avec les acteurs industriels du domaine. ■

[1] A. Murangira, M. Munoz Zuniga, T. Perdrizet. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01230454/document>, 2015.

[2] W. van Ackooij, I. Aleksovska, M. Munoz Zuniga. *Submitted to Set-Valued and Variational Analysis*, 2017.

Contact scientifique :  
miguel.munoz-zuniga@ifpen.fr



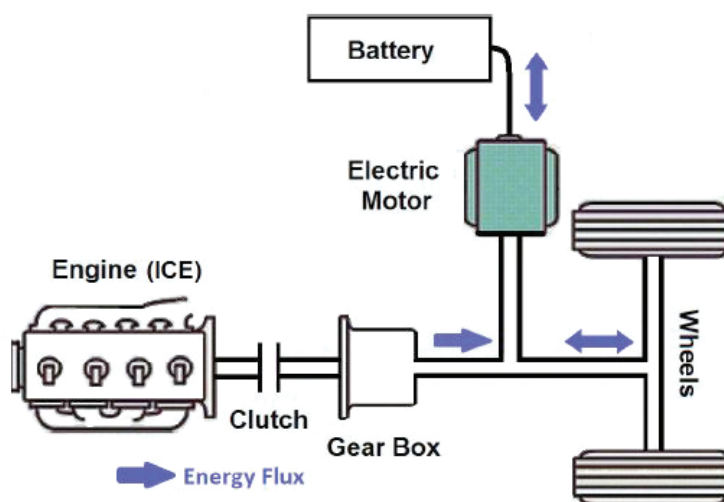
# L'énergie dans les véhicules : voyez comment on gère !

Dans les véhicules hybrides, des algorithmes embarqués visent à répartir la puissance entre les différentes sources d'énergie, de manière à minimiser la consommation de carburant et/ou les émissions polluantes. Cette gestion en temps réel nécessite une démarche d'optimisation dynamique (ou commande optimale).

IFPEN a développé, dans le cadre d'un travail de thèse<sup>(1,2)</sup>, une méthode d'optimisation de la gestion de l'énergie intégrant des températures internes – du moteur et/ou du système de post-traitement des gaz – qui constituent des états dynamiques non pris en compte par les gestionnaires optimisés<sup>3</sup> classiques.

Dans une première phase, en utilisant une connaissance préalable du cycle de conduite, des lois de gestion ont été déterminées à l'aide du principe du minimum de Pontryagin<sup>4</sup>. En se basant sur des résultats numériques, un compromis a été établi entre l'optimalité du gestionnaire et la complexité du modèle utilisé. Pour chacun des différents cas étudiés, l'impact de la simplification mise en œuvre a été estimé à l'aide de la théorie des perturbations régulières en commande optimale.

Dans une seconde phase, la méthode ECMS a été enrichie en y incluant les nouvelles dynamiques thermiques. Il en a résulté des stratégies sous-



Flux d'énergie dans un véhicule hybride, à contrôler par le gestionnaire embarqué.

optimales – mais affranchies du besoin de connaître le cycle de conduite – lesquelles ont ensuite été validées numériquement et expérimentalement.

La méthode mise au point pourra être généralisée à d'autres problèmes de commande optimale multi-état ou, de manière générale, complexes. ■

[1] D. Maamria, A. Sciarretta, F. Chaplais, N. Petit (2017), in Proc. of the IFAC World Congress, Toulouse, France, 9-14 Jul. 2017.

[2] D. Maamria, F. Chaplais, N. Petit, A. Sciarretta (2015), Proc. of the American Control Conf. (ACC), Chicago, IL, 1-3 Jul. 2015. DOI : 10.1109/ACC.2015.7171183

a - basés sur la méthode ECMS (Equivalent Consumption Minimization Strategy) dans laquelle le coût équivalent de l'électricité, inconnu (état adjoint), est calculé en fonction de la charge de la batterie mesurée (état).

b - principe mathématique qui permet d'énoncer des conditions nécessaires d'optimalité.

Contact scientifique : antonio.sciarretta@ifpen.fr

## Actualités

• La revue Oil and Gas Science and Technology d'IFPEN a recueilli 1 555 citations d'articles en 2016 permettant d'obtenir un facteur d'impact à deux ans de 1,184, en hausse par rapport à l'année 2015 (1,087). Le facteur d'impact à cinq ans reste stable à 1,361. Dans la catégorie « Engineering, Petroleum », la revue se classe à la 8<sup>e</sup> place (sur 21) et à la 2<sup>e</sup> pour les journaux en open access.

• IFP School figure au 5<sup>e</sup> rang du classement mondial des meilleures écoles d'ingénieurs et universités dans le domaine pétrole et gaz pour 2017, selon la revue anglo-américaine CEOWorld Magazine.

## Visiteur scientifique

• Ardalan Vahidi, Professeur associé à la faculté d'Ingénierie mécanique de l'université de Clemson (USA), a été accueilli en tant que visiteur scientifique dans la direction Mécatronique et Numérique. Il a notamment travaillé sur le contrôle de la conduite du véhicule connecté et/ou autonome pour une meilleure efficacité énergétique.

## Récompense

• Un article intitulé « Scale-up agitation criteria for Trichoderma reesei fermentation », rédigé par des chercheurs IFPEN, fera la une de la revue Chemical Engineering Science de décembre.

## Prochains événements scientifiques

• Rencontre scientifique C2E-Colloids and Complex Fluids for Energies, 4 au 6 décembre, Rueil-Malmaison – www.rs-colloids2017.com/

• Workshop Scienc'Innov sur le thème « Learning from Scientific Data in Energy », 16 et 17 janvier 2018, Rueil-Malmaison – www.ws-datascien2018.com

Directeur de la publication : Marco De Michelis  
Rédacteur en chef : Éric Heintzé  
Comité éditorial : Xavier Longaygue, Laurent Forti, Benjamin Herzhaft  
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 30 • Octobre 2017

www.ifpenergiesnouvelles.fr

@IFPENinnovation

