


Rédigé le 01 octobre 2017

15 minutes de lecture

**Actualités**

**Recherche fondamentale**

**Sciences de l'ingénieur** **Systèmes d'automatisation et de contrôle** **Mathématiques et informatique** **Méthodes numériques et optimisation**

## nde 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

---

**Voir le PDF de la lettre**

---

# LES BRÈVES

**La tenue en fatigue des éoliennes offshore flottantes** est **fortement impactée par les sollicitations de la houle** sur les plateformes qui les supportent.

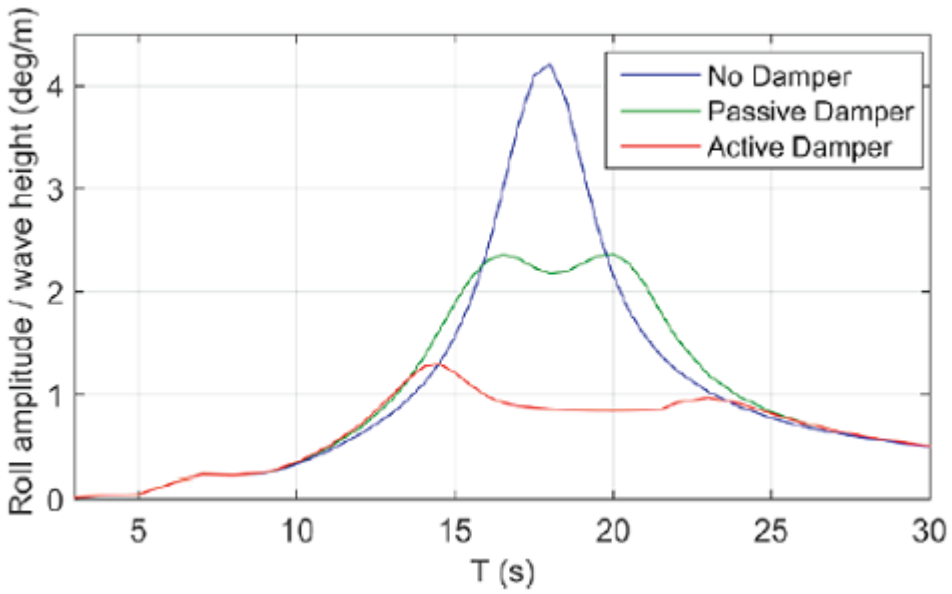
**Des systèmes d'amortissement passifs ou actifs**, si possible peu coûteux, sont donc recherchés pour atténuer ces effets.

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 multidirectionnel**, disposé en forme d'étoile, d'abord modélisé, et pour lequel **une loi de contrôle actif** a été proposée[1-3]. 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 (cf. figures).

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.



***(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**

**> NUMÉRO 30 DE SCIENCE@IFPEN**

Contrôle des plateformes éoliennes offshore : être actif réduit la fatigue

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

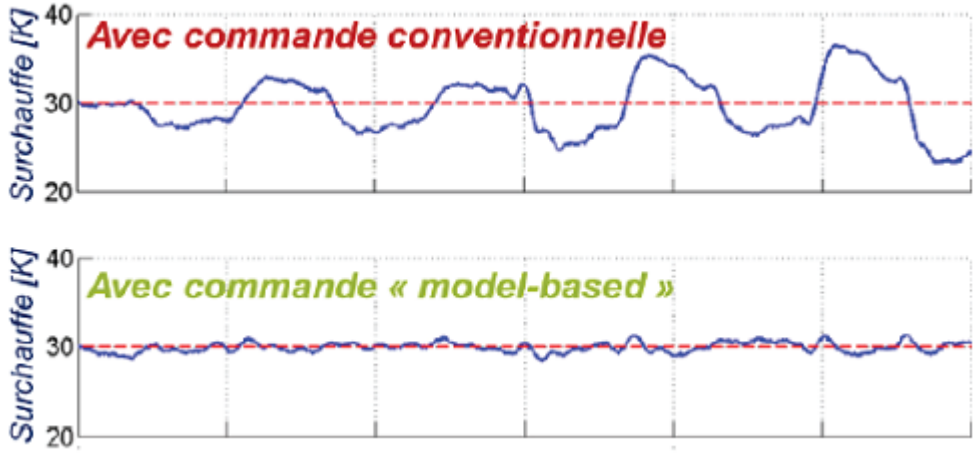
Bien maîtrisée pour des applications stationnaires, telles que les centrales thermiques, cette technologie devient très complexe pour les transports, en raison de **conditions de fonctionnement éminemment transitoires**, ce qui rend indispensable un **système de contrôle/commande efficace**.

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[b].

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** (cf. 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.




Régulation de surchauffe, sortie évaporateur.

**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(1). 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 %)(2).

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

*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. ***Organic Rankine Cycle for Vehicles: Control Design and Experimental Results*** - 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. **Optimal control for an organic rankine cycle on board a diesel-electric railcar** - Journal of Process Control, vol. 33, 2015, pp. 1-13, ISSN 0959-1524.*
*>> DOI : 10.1016/j.jprocont.2015.03.009*

---

**Contact scientifique : paolino.tona@ifpen.fr**

**> NUMÉRO 30 DE SCIENCE@IFPEN**

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

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** :

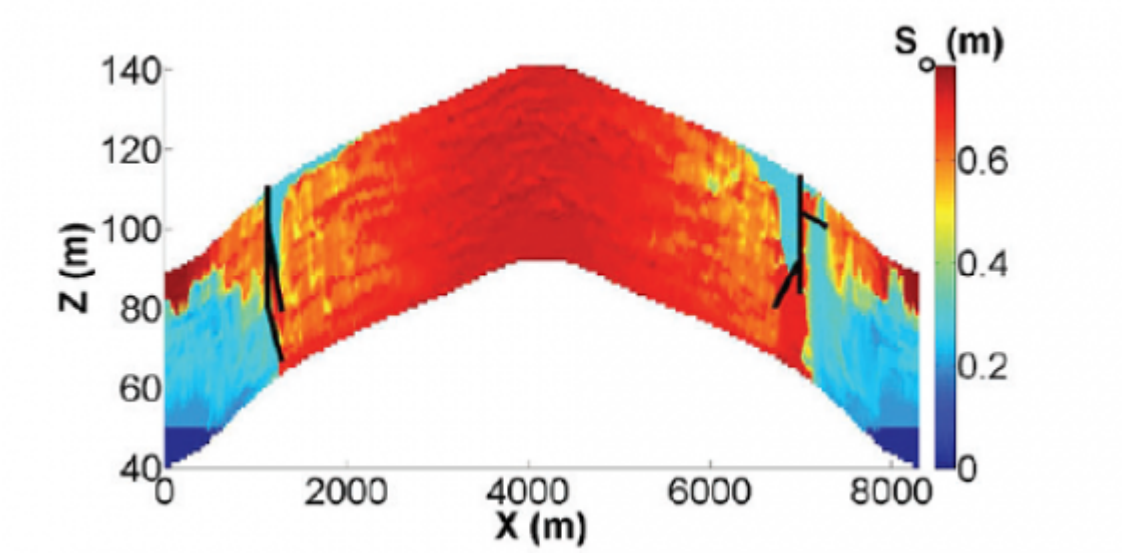
- **la position**,
- **la trajectoire**,
- et **le type des puits**.

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[1, 2] :

- **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, ***A Mixed-Integer Nonlinear Optimization Approach for Well Placement and Geometry***, Proc. 14th European Conference on the Mathematics of Oil Recovery (ECMOR), 2014.
>> DOI: 10.3997/2214-4609.20141889

---

**Contact scientifique : Delphine Sinoquet**

**> NUMÉRO 30 DE SCIENCE@IFPEN**

Des placements optimisés pour des ressources qui durent

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[1] 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[1-2].

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.

**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 %**[1], **tout en maintenant inchangée la production d'éthanol**.

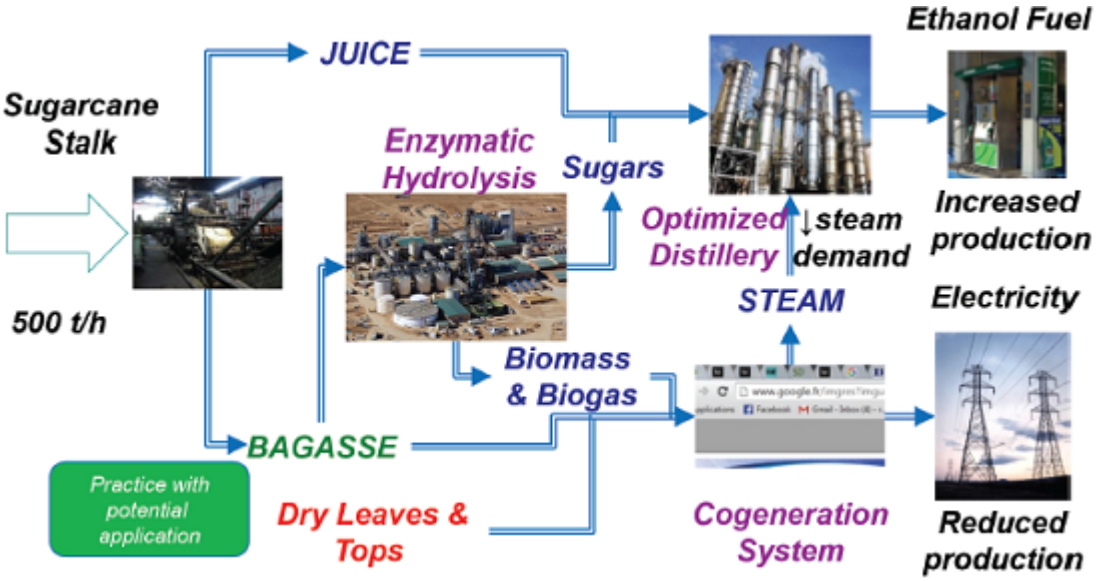



Schéma d'un procédé de production d'éthanol et de cogénération de chaleur/électricité.

---

***(1)*** R. Bechara, ***Methodology for the design of optimal processes: application to sugarcane conversion processes***, thèse de doctorat, université Lyon 1 (2015)
>> https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01276302/document

***(2)*** R. Bechara, A. Gomez, V. Saint-Antonin, J-M. Schweitzer, F. Maréchal, ***Methodology for the optimal design of an integrated sugarcane distillery and cogeneration process for ethanol and power production*** - Energy 117 (2016).
>> DOI: 10.1016/j.energy.2016.07.018

***(3)*** R. Bechara, A. Gomez, V. Saint-Antonin, J-M. Schweitzer, F. Maréchal, ***Methodology for the design and comparison of optimal production configurations of first and first and second generation ethanol with power***, Applied Energy, 2016
>> DOI: 10.1016/j.apenergy.2016.09.100

***(4)*** R. Bechara, A. Gomez, V. Saint-Antonin, J-M. Schweitzer, F. Maréchal, ***Methodology for the optimal design of an integrated first and second generation ethanol production plant combined with power cogeneration***, Bioresource Technology, 2016
>> DOI: 10.1016/j.biortech.2016.04.130

---

Contact scientifique : **adrien.gomez@ifpen.fr**

**> NUMÉRO 30 DE SCIENCE@IFPEN**

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

**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.

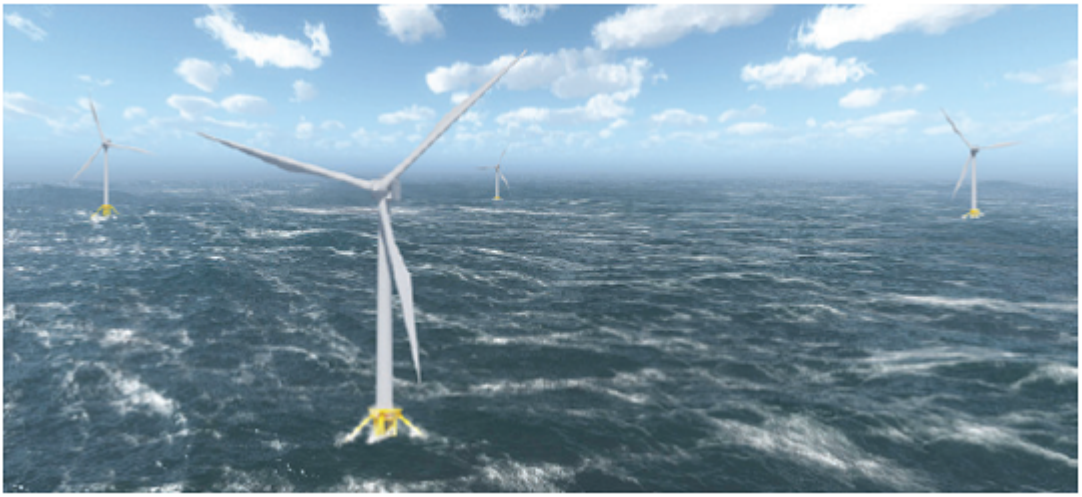
Ces deux difficultés ont été traitées respectivement :

- **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(1).

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(2).

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.



Champ d'éoliennes flottantes

---

***(1)*** A. Murangira, M. Munoz Zuniga, T. Perdrizet. ***Structural reliability assessment through metamodel based importance sampling with dimension reduction***.
>> 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**

**> NUMÉRO 30 DE SCIENCE@IFPEN**

Éolien flottant : gagner en fiabilité dans l’océan des possibles

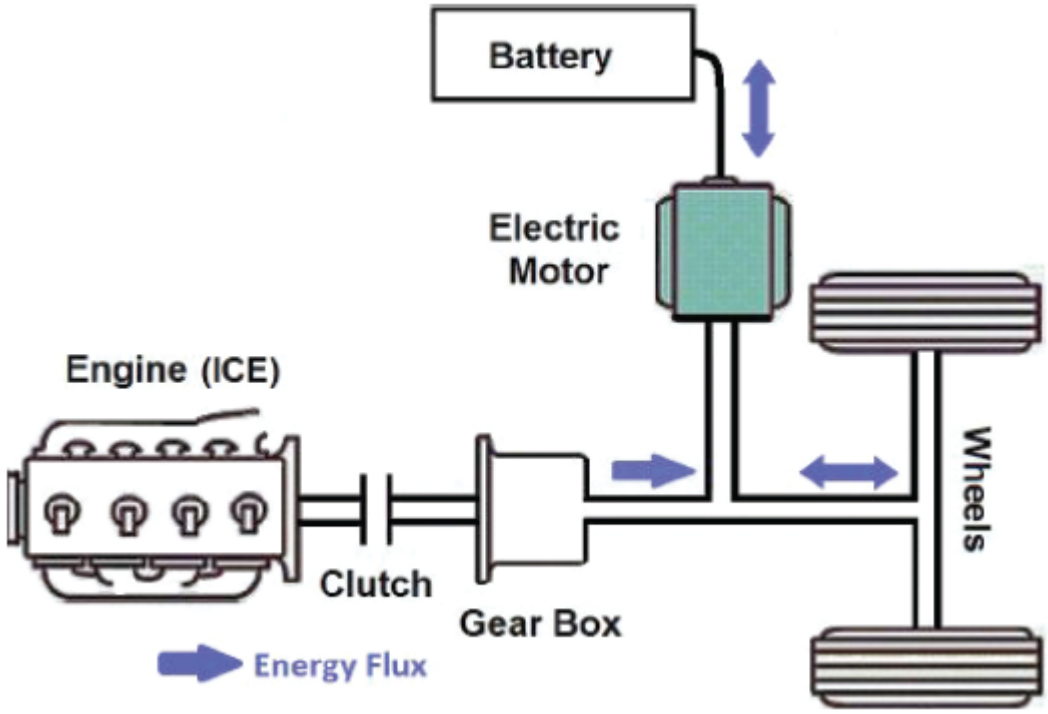
Dans les **véhicules hybrides, des algorithmes embarqués visent à répartir la puissance entre les différentes sources d'énergie**, de manière à minimiser la consommation de carburant et/ou les émissions polluantes. **Cette gestion en temps réel** nécessite une **démarche d'optimisation dynamique** (ou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

IFPEN a développé, dans le cadre d'un travail de thèse[1, 2], **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[a] 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[b]**. 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-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.




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

*[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.*

---

***(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), ***Comparison of several strategies for HEV energy management system including engine and catalyst temperatures*** - Proc. of the American Control Conf. (ACC), Chicago, IL, 1-3 Jul. 2015.
>> DOI: 10.1109/ACC.2015.7171183

---

Contact scientifique : **Antonio Sciarretta**

**> NUMÉRO 30 DE SCIENCE@IFPEN**

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

Numéro 30 de Science@ifpen - Commande et optimisation des systèmes complexes
01 octobre 2017

Lien vers la page web :