Science @ifpen
N° 52 - Août 2023

Rédigé le 23 août 2023

15 minutes de lecture

Actualités

Recherche fondamentale

Richard Tilagone

Directeur de la Direction « Mobilité & Systèmes »

Christian Angelberger

Adjoint Scientifique de la Direction « Mobilité & Systèmes »

La mobilité des biens et des personnes est une composante clef pour le développement des sociétés modernes, mais en assurer la pérennité impose de réduire la consommation énergétique associée tout en limitant ses impacts sur l'environnement et la santé. Développer des solutions technologiques au service d'**une mobilité plus durable et socialement acceptable** est une des raisons d'être et la force motrice de la Direction « Mobilité & Systèmes ».

À cet effet, nous contribuons au développement de systèmes de motorisations innovants, qu'ils soient électriques, thermiques ou hybrides, pour une mobilité décarbonée, énergétiquement efficace et à faible voire zéro émission. Notre R&I technologique repose sur un socle fondamental riche, combinant développements de méthodes et d'outils pour la conception de systèmes mécatroniques complexes, de techniques et de logiciels de simulation allant du système au multidimensionnel, de techniques et d'équipements de mesure avancés. Nos points de différenciation résultent de notre capacité à les mettre en œuvre dans une approche de conception multiphysique (mécanique des solides et des fluides, thermodynamique, cinétique chimique, électromagnétisme), multi-échelle (du composant au système) et multi-objectifs (efficacité énergétique, réduction des émissions, tenue et durabilité mécanique, thermique et chimique).

Le domaine de la mobilité, jusqu'à très récemment focalisé sur des motorisations thermiques alimentées par des carburants fossiles, a entamé une profonde mutation dont la portée est encore difficile à cerner. Ainsi, même si l'électrification représentera sans aucun doute une des solutions majeures pour la mobilité, il semble établi qu'elle ne pourra pas à elle seule répondre aux enjeux complexes de la mobilité, et donc que des approches complémentaires basées sur la consommation de carburants et d'énergies décarbonés feront partie du champ des solutions.

Afin d'accompagner ces mutations, notre Direction a profondément fait évoluer ses thématiques de recherche. Son originalité dans ce contexte est d'avoir su investir celles liées à l'électrification, tout en faisant évoluer des axes historiques centrés sur la combustion et le post-traitement des effluents, nous permettant de proposer une approche novatrice et différenciante dans un domaine très compétitif.

Ce numéro spécial propose d'illustrer la manière dont certaines de nos activités de recherche fondamentale viennent alimenter et enrichir nos travaux de R&I au service d'une mobilité durable. Nous espérons qu'il permettra de révéler les importants changements intervenus au sein de la Direction « Mobilité & Systèmes », et vous invitons à prendre contact avec les collègues qui vous partageront nos ambitions à court, moyen et long termes.

LES BRÈVES

L'objectif de neutralité carbone à horizon 2050 nécessite une réduction drastique des émissions de CO_2 liées au transport, responsable à lui seul de plus de 30 % du CO_2 émis mondialement. Pour le transport routier, il est prévu que cette décarbonation s'appuie en partie sur le déploiement de véhicules électriques à batteries. Cependant, cette solution impose des contraintes (poids et volume des batteries, autonomie, temps de charge, infrastructure de recharge) qui ne permettent pas de répondre à tous les usages. C'est le cas des applications dites lourdes (poids lourds longs routiers, autocars, engins de chantiers), pour lesquelles l'hydrogène décarboné représente une alternative crédible.

Deux approches différentes co-existent en la matière et sont actuellement étudiées à IFPEN :

- **le moteur thermique**, utilisant directement l'hydrogène comme carburant à la place des hydrocarbures aujourd'hui disponibles ;
- **les piles à combustible** (PAC), utilisant l'hydrogène pour produire de l'électricité à bord et alimenter le moteur électrique d'un véhicule.

Le moteur thermique à hydrogène

Les caractéristiques physico-chimiques de l'hydrogène et les propriétés qui en résultent en font un candidat pertinent pour la combustion dans un moteur : large plage d'inflammabilité, faible énergie d'allumage, vitesse de combustion élevée.

En 2020, IFPEN a débuté ses travaux par une première campagne expérimentale sur un moteur monocylindre de recherche, ce qui a permis d'identifier les obstacles à lever pour ce type de moteur. Le principal d'entre eux est d'assurer un haut niveau de rendement tout en maitrisant les émissions de NOx et en évitant les combustions anormales pouvant endommager le moteur [1] [2]. La figure 1 résume les défis et les axes de recherche IFPEN[1] pour les relever.

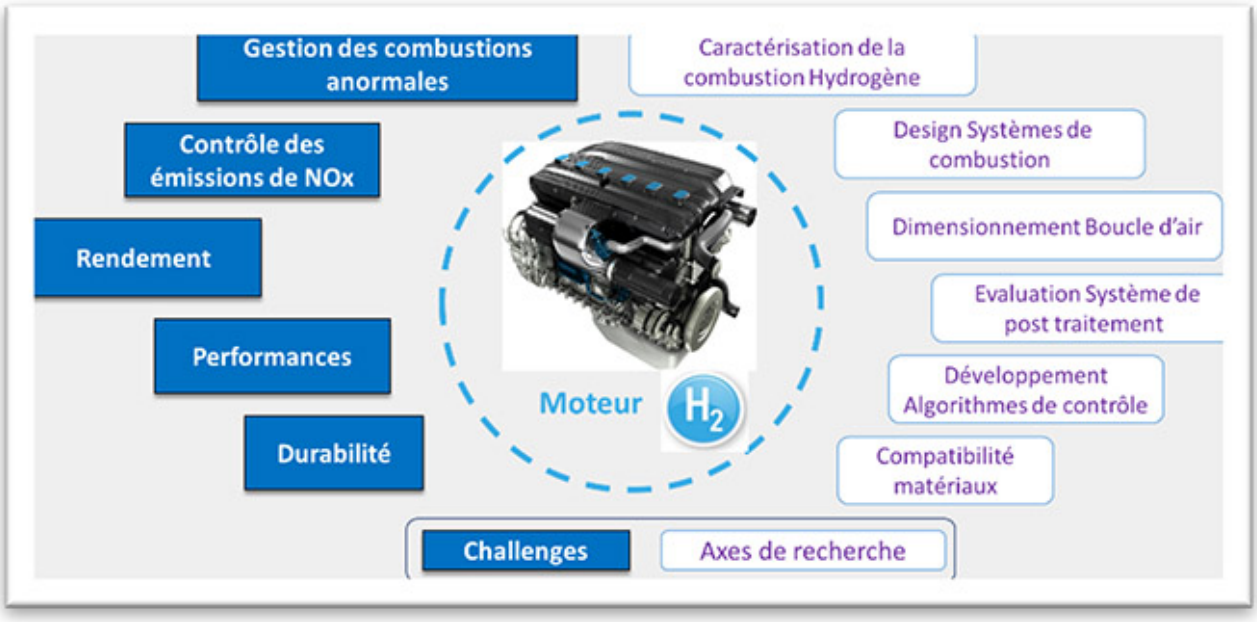


Figure 1 : Défis concernant l'utilisation de l'hydrogène dans un moteur thermique et axes de recherche IFPEN

IFPEN est aujourd'hui investi dans le développement de ses moyens et de ses compétences afin de lever l'ensemble des challenges identifiés [3].

En particulier, des outils 3D permettent de simuler la combustion turbulente d'hydrogène dans un moteur thermique afin d'optimiser au plus tôt, lors de la phase de conception, les géométries prometteuses de la chambre de combustion.

Des travaux de recherche fondamentale sont donc engagés afin d'assurer la robustesse et la prédictivité de ces outils numériques :

- visualisation et simulation d'une injection H_2 (figure 2) avec des moyens de visualisation avancés développés par la Direction « Mobilité et Systèmes » ;
- simulation par le **code Converge** du mélange H_2/air dans la chambre de combustion lors d'une injection directe d'H_2 (figure 3) ;
- description de la propagation de la flamme et du phénomène d'auto-inflammation, représentation des phénomènes pariétaux[2].

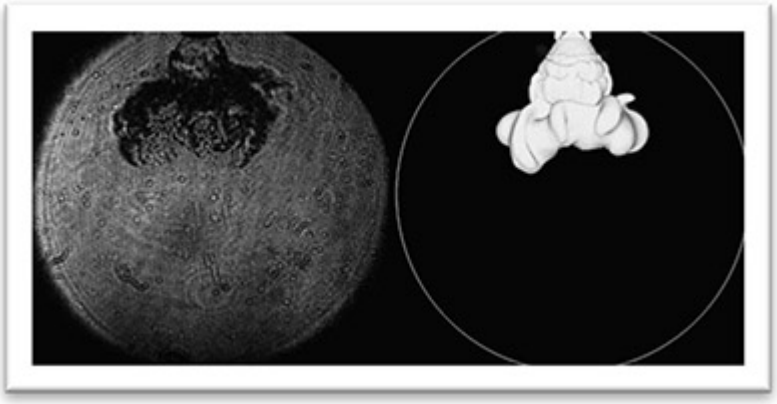


Figure 2 : Visualisation et simulation d'une injection H2 en cellule

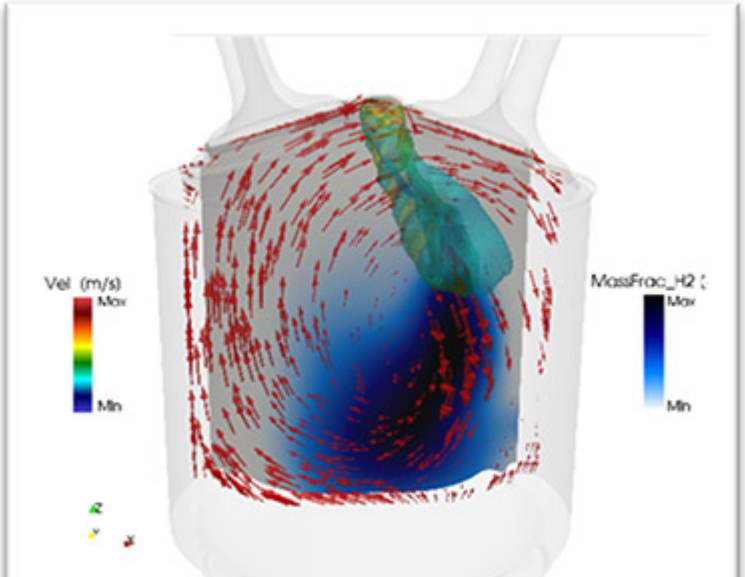


Figure 3 : Simulation de l’injection du mélange H2/air dans une chambre de combustion moteur

Les piles à combustible (PAC)

Le véhicule à pile à combustible est une solution alternative au véhicule 100 % électrique lorsque le recours à une batterie seule ne répond plus aux contraintes de l’utilisateur : besoin en énergie supérieur à 0,5 MWh à l’échelle de la mission, ou utilisation intensive incompatible avec un temps de recharge de plusieurs dizaines de minutes. [4, 6].

L’utilisation d’une ou de plusieurs PAC à bord d’un véhicule nécessite une approche « système » afin de gérer les nombreuses interactions entre les différentes fonctions, aussi bien lors de la conception du véhicule que lors de son usage : génération combinée d’électricité (PAC et batterie), adaptation électrique entre les sources et les consommateurs à bord, refroidissement de l’ensemble des composants du véhicule, prise en compte des effets du vieillissement de la PAC, etc.

Les développements de la Direction « Mobilité et Systèmes », menés en lien étroit avec d’autres directions d’IFPEN[3],se focalisent sur trois aspects :

- l’optimisation du dimensionnement du couple batterie/PAC afin de prendre en compte le besoin en énergie, mais aussi les appels de puissance au cours de la mission assignée au véhicule [5],
- la conception d’électroniques de puissance adaptées à la gestion simultanée de plusieurs sources de courant continu (DC[4]) dont la tension varie à tout instant,
- la minimisation du vieillissement du couple batterie/PAC, par une meilleure identification et prise en compte des phénomènes accélérant le vieillissement et une optimisation de leur fonctionnement couplé.

Concernant ce dernier point, une modélisation fine des phénomènes électrochimiques et thermiques au cœur des cellules de la PAC est actuellement réalisée (figure 4). La formation de l’eau liquide au cœur de la pile - consécutive à la réaction de l’hydrogène - puis son cheminement et enfin son évacuation font l’objet d’une étude spécifique.

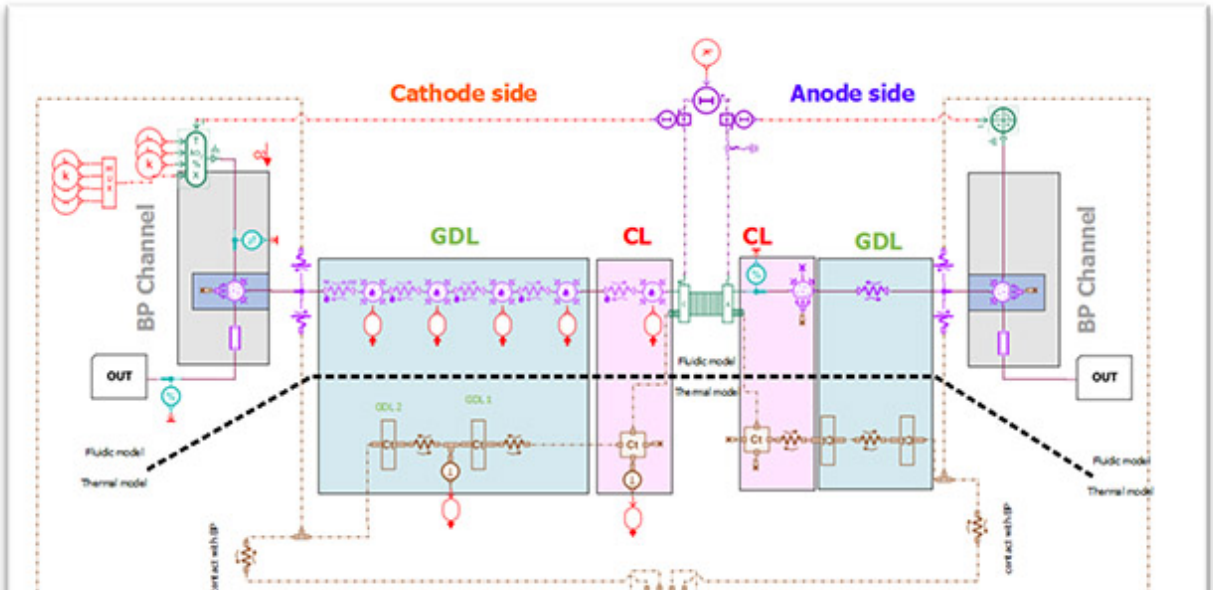


Figure 4 : Modèle d'une cellule de pile à combustible permettant la prise en compte détaillée des phénomènes électrochimiques et thermiques (plateforme Simcenter Amesim®)

L'analyse fine ainsi réalisée des spécificités de ces deux modes de propulsion utilisant le vecteur énergétique hydrogène vise à apporter au plus vite des solutions complémentaires, adaptées aux différents cas d'usage de la mobilité décarbonée.

1- Chaque défi peut être pris en charge par plusieurs axes de recherche et vice versa.
2- Phénomènes liés à la paroi : transfert thermique, formation de points chauds, etc.
3- « Sciences et technologies du numérique », « Physico-chimie et mécaniques appliquées », « Economie et veille ».
4- Direct Current.

Références bibliographiques

1. Rouleau L., Duffour F., Walter B., Kumar R. et al., ***Experimental and Numerical Investigation on Hydrogen Internal Combustion Engine***, SAE Technical Paper 2021-24-0060, 2021.
   >> https://doi.org/10.4271/2021-24-0060

2. Laget O., Rouleau L., Cordier M, Duffour F., Maio G., Giuffrida V., Kumar R., Nowak L., ***A comprehensive study for the identification of the requirements for an optimal H_2 combustion engine***, International Journal of Engine Research.
   >> https://doi.org/10.1177/14680874231167618

3. Maio, G., Boberic, A., Giarracca, L., Aubagnac-Karkar, D., Colin, O., Duffour, F., Deppenkemper K., Virnich L., Pischinger, S. (2022). ***Experimental and numerical investigation of a direct injection spark ignition hydrogen engine for heavy-duty applications***. International Journal of Hydrogen Energy, 47(67), 29069-29084.
   >> https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.06.184

4. Sery J., Leduc P., ***Fuel cell behavior and energy balance on board a Hyundai Nexo***. International Journal of Engine Research. December 2021.
   >> https://doi.org/10.1177/14680874211059046

5. Loszka M., Martin R., Guyon O., Leduc P., ***TranpLHyn – Transports Lourds fonctionnant à l'Hydrogène***. Librairie en ligne de l'ADEME, août 2022.
   >> https://librairie.ademe.fr/mobilite-et-transport/5722--tranplhyn-transports-lourds-fonctionnant-a-l-hydrogene.html

6. Leduc P., ***Véhicules à pile à combustible à hydrogène - applications et défis***. Les 13èmes Tables Rondes de l'Arbois et de la Méditerranée, *L'hydrogène : mythes et réalités*, Aix-en-Provence, mai 2023.

Vidéo sur YouTube – Intervention de Pierre Leduc de 00:36:00 à 01:15:00 :
>> https://www.youtube.com/watch?v=KJBNfNuGQHM

Contacts scientifiques - Combustion hydrogène : florence.duffour@ifpen.fr - Pile à combustible : pierre.leduc@ifpen.fr

>> NUMÉRO 52 DE SCIENCE@IFPEN

VOUS SEREZ AUSSI INTÉRESSÉ PAR

Recherche fondamentale

Actualités mars 2023

Des poids lourds qui carburent à l'hydrogène : une solution pour diminuer l'empreinte carbone du transport ?

Motorisations thermiques

Mécanique des fluides **Technologie de la combustion et des moteurs**
Modélisation et simulation des systèmes

Hydrogène : deux voies complémentaires pour une mobilité durable

En associant batterie, machine électrique, électronique de puissance et transmission mécanique, le véhicule électrique est un exemple d'application qui conjugue un ensemble de contraintes pour la formulation des fluides techniques.

L'étude de ces derniers pour le domaine des transports connaît donc un regain d'intérêt depuis quelques années.

Cela concerne d'une part la formulation de produits à faible impact environnemental et d'autre part l'optimisation de mélanges pour répondre à des conditions de travail complexes.

En effet, outre les fonctions de lubrification et de transport de calories, il faut s'assurer de leur compatibilité avec les matériaux, et la présence de champs électromagnétiques nécessite le suivi de leurs propriétés diélectriques. Enfin, le tout doit se faire sans dégrader leur durée de vie, telle qu'imposée par les cahiers des charges.

Or, la formulation de ces fluides repose encore beaucoup sur des résultats d'expériences qui ne sont pas aisément transposables aux nouveaux systèmes étudiés. De plus, la combinaison de différentes sollicitations complexifie leurs mécanismes d'altération, et donc l'évolution de leurs propriétés en service, requérant ainsi de nouvelles méthodes expérimentales et numériques pour en appréhender l'origine et ainsi accompagner les développements technologiques où ils sont présents.

C'est pourquoi, pour divers fluides destinés aux véhicules électriques, les équipes d'IFPEN initient une activité de recherche destinée à mieux comprendre les processus de vieillissement en environnement multifonctionnel (figure 1). La démarche se décompose en trois étapes :

- la première vise à évaluer la réponse de divers fluides soumis à des contraintes successives, comme par exemple mesurer l'impact d'un cisaillement mécanique préalablement à un processus d'oxydation ;
- la deuxième consiste à développer un nouveau dispositif expérimental basé sur la microfluidique pour caractériser de manière couplée l'impact des contraintes données (cisaillement, oxydation, champ électromagnétique, etc.) sur de faibles volumes de fluides ;
- la dernière vise à étendre nos approches de modélisation du vieillissement en combinant la chimiométrie[1] et la cinétique chimique, à partir de la compréhension à l'échelle moléculaire, afin d'identifier des descripteurs chimiques pertinents pour le qualifier.

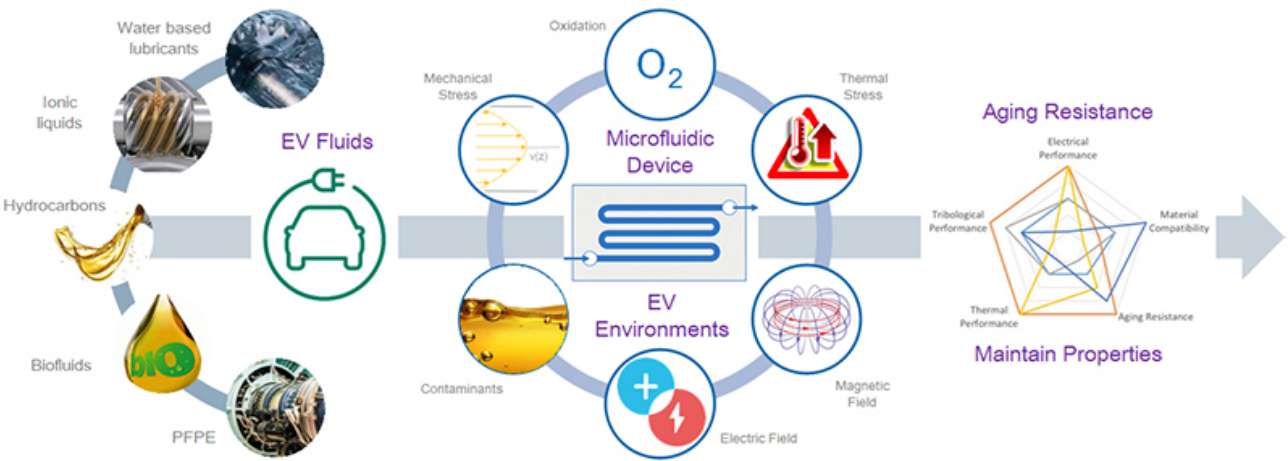


Figure 1 : Illustration de la méthodologie déployée pour étudier le vieillissement de fluides techniques en environnements complexes.

IFPEN a par ailleurs mis en place un rhéomètre équipé de différents accessoires (magnétorhéologie, électrorhéologie, purge du gaz, contrôle de température) pour mener des mesures, in-situ et ex-situ, des propriétés du liquide dans un environnement contrôlé et sous des sollicitations multiples. Cet équipement sert actuellement aux premières caractérisations de fluides techniques en environnement complexe pour le compte d'un consortium de recherche initié fin 2022 et piloté par IFPEN. Celui-ci regroupe des constructeurs automobiles et des producteurs de fluides techniques qui, au-delà de l'évaluation de leurs produits, espèrent en repousser les limites d'usage, dans la perspective de nouvelles applications. En parallèle, des travaux post-doctoraux évaluent l'utilisation de la chimiométrie pour la caractérisation du vieillissement de ces fluides à l'échelle du laboratoire [1].

L'usage optimisé des fluides techniques dans les transports est à la fois un enjeu économique et environnemental qui soulève encore de multiples questions de recherche et c'est pourquoi il engendre à IFPEN à la fois des travaux de compréhension et le déploiement de moyens associés. Pour lever les verrous scientifiques sous-jacents, cette recherche s'inscrit également dans un cadre de démarche collaborative avec des laboratoires académiques.

[1]- La chimiométrie est l'application d'outils mathématiques, en particulier statistiques, pour obtenir le maximum d'informations à partir de données chimiques.

Référence bibliographique

1. Xu Boyang, Matrat Mickaël, Lacoue-Negre Marion, en préparation.

Contacts scientifiques : mickael.matrat@ifpen.fr - boyang.xu@ifpen.fr

>> NUMÉRO 52 DE SCIENCE@IFPEN

Vieillissement de fluides techniques en environnements multifonctionnels

Selon l'OMS, 7 millions de décès prématurés par an dans le monde sont liés à la mauvaise qualité de l'air, problème auquel le transport routier contribue significativement. Grâce aux évolutions règlementaires et technologiques, ainsi qu'au renouvellement du parc automobile, les émissions de ce secteur sont certes en baisse ces dernières années. Toutefois celui-ci reste un fort contributeur à la dégradation de la qualité de l'air, avec par exemple 49 % des émissions de NOx en France en 2020 (dont la moitié pour les véhicules particuliers) et 13 % des émissions de $PM_{2,5}$ [1] (dont 1/3 pour les véhicules particuliers).

L'évaluation des solutions de remédiation mises en œuvre (technologies véhicules, infrastructures, usages) doit s'appuyer sur un diagnostic précis, exhaustif et fiable à la fois des sources (gaz bruts aux points d'émissions) et de la qualité de l'air qui en résulte (gaz dilués et génération de polluants secondaires). De plus, la qualité de l'air peut être très impactée par les conditions locales (confinement, météorologie, etc.) et par ailleurs les niveaux d'émissions des véhicules sont très sensibles à leurs conditions d'usages réels. Aussi est-il crucial de se doter d'outils pour évaluer ces dernières et leur incidence sur les émissions de polluants.

Dans ce cadre, l'approche proposée à IFPEN pour relier les émissions d'un véhicule aux conditions réelles de conduite couple :

- une mesure sur route,
- une modélisation à l'échelle des véhicules,
- une collecte à grande échelle de données d'usage.

Pour toute zone géographique d'intérêt (centre urbain, résidentiel, proche trafic, etc.), cette approche permet de quantifier la variabilité des émissions en usage réel en fonction du parc automobile et du comportement de conduite, afin d'envisager des solutions de remédiation adaptées.

Conception des systèmes de mesure

Des travaux de recherche se sont focalisés sur la spectroscopie dans le domaine de l'Ultra-Violet, aboutissant au système d'analyse multi-gaz ELEMENTS [1,2], qui permet, entre autres, de mesurer les oxydes d'azote (NOx), et dont les développements actuels visent à en faire aussi un outil de quantification des particules fines.

Le développement de l'algorithme chimiométrique a nécessité la mise en place d'une plateforme de tests numériques afin de simplifier la phase de calibration.

L'outil développé permet de créer des spectres composites associant des informations issues de la littérature (spectres de référence) et le bruit et les défauts du système optique réel (source de lumière, spectroscope, chemin optique). Cela a abouti à l'élargissement des composés mesurables : indicateurs de combustion (O_2, H_2O)[2] et certains polluants industriels (H_2S, Cl_2, Benzène, Toluène), en complément du panel de gaz déjà caractérisés (NO, NO_2, NH_3, SO_2).

Des travaux de thèse [3] ont également validé la faisabilité d'exploiter les propriétés de diffusion des particules de combustion dans l'Ultra-Violet en fonction de leurs propriétés physiques et chimiques.

Déploiement des mesures sur le terrain

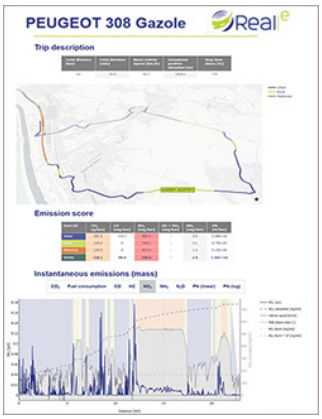
Pour mesurer les émissions au cœur du trafic routier, l'analyseur ELEMENTS a été intégré dans le système de mesure embarquée « RealE » (voir figure 1) [2, 4].

Cet outil a servi à évaluer les performances environnementales des véhicules particuliers dans le cadre d'une étude pour les Pouvoirs publics. Elle a permis de fournir des données objectives concernant les émissions réelles de véhicules satisfaisant les dernières normes d'émissions (Euro 6) tout en s'intéressant, qui plus est, à certains composés non encore règlementés (Euro7) [5].

L'analyseur RealE est également au cœur de plusieurs études :

- pour l'Ademe, l'objectif étant d'évaluer le potentiel de la mesure embarquée pour une surveillance accrue des performances du parc automobile [6],
- dans le cadre du projet européen LENS, consacré à l'évaluation et à la réduction des émissions des 2-roues [7].

***Figure 1** : illustrations du système d'analyse embarqué RealE*



Ces études en conditions réelles ont été précédées par des campagnes extensives en laboratoire, par exemple dans le cadre des études RHAPSODIE 1 et 2[3], lesquelles avaient permis de dresser un bilan étendu des émissions de véhicules, règlementées et non règlementées, gazeuses et particulaires[4], ainsi que de déterminer l'impact de biocarburants introduits à différents taux [8].

Extension aux parcs de véhicules et aux territoires

En forte synergie avec la direction « Sciences et Technologies du Numérique » d'IFPEN, des travaux de recherche engagés au sein de la direction « Mobilité et Systèmes » sont menés pour modéliser les émissions du transport routier dans des conditions variées d'usages réels, et en tirer des simulations non plus pour un véhicule donné mais à l'échelle du parc automobile, sur un territoire regroupant une multitude de technologies moteur et de cas d'usage.

Cette démarche a notamment été déployée pour évaluer la pertinence de différents niveaux d'électrification pour la décarbonation des véhicules particuliers [9, 10].

Développement de solutions de remédiation

Pour limiter les polluants à la source, des travaux sont menés avec la direction « Catalyse, Biocatalyse et Séparation » d'IFPEN, afin de trouver des solutions de traitement innovantes. Ainsi, des adsorbants de NOx de forte capacité, à base de zéolithes, ont été mis au point [11].

Par rapport à l'état de l'art, les zéolithes développées peuvent aussi être utilisées en réduction sélective à l'ammoniac (NH_3-SCR), apportant ainsi un gain sur la température d'amorçage de la réaction et en stabilité hydrothermale du catalyseur [12].

[1-] Particules dont le diamètre est ? 2,5 µm.
[2-] Mesurés dans les produits de combustion pour suivre la richesse du mélange, et également pour passer d'une mesure sèche à une mesure humide.
[3-] Menées dans le cadre d'appels à projets ADEME CORTEA (Connaissance et réduction des émissions de polluants dans l'air).
[4-] 150 composés étudiés, ainsi qu'une mesure du nombre de particules.

Références bibliographiques

1. ***Procédé et système de mesure optique de la concentration d'espèces gazeuses de gaz d'échappement***
   >> Brevet WO2019020326

2. Schiffmann, P., Kermani, J., Dégeilh, P., Frobert, A., Agouzoul,Y., ***Robust and Affordable IoT Solution for In-service Conformity Testing***, SAE Technical Paper 2020-01-2187, 2020.
   >> https://doi.org/10.4271/2020-01-2187

3. Mouad DAOUDI, ***Développement de diagnostics optiques et chimiques pour caractériser et contrôler les émissions particulaires et gazeuses des systèmes de combustion*** (*Development of optical and chemical diagnostics to characterize and control particulate and gaseous emissions from combustion systems*), thèse soutenue le 07/12/2022.
   >> https://www.theses.fr/2022ULILR062

4. Schiffmann P., Frobert A. and Agouzoul Y., ***REAL-e a compact measurement system for regulated and unregulated emissions***, SIA Congress, 2020

5. Philippe Dégeilh, Joseph Kermani, Jules Sery, Pierre Michel. ***Study of Euro 6d-TEMP emissions - IFPEN for DGEC: Summary report***. [Research Report] Ministère de l'Ecologie. 2020. ?hal-03632915?
   >> https://hal-lara.archives-ouvertes.fr/hal-03632915/

6. *Projet* ***SESAME***
   >> https://librairie.ademe.fr/air-et-bruit/5736-projet-sesame.html

7. *Projet européen **LENS***
   >> https://www.lens-horizoneurope.eu/

8. *Projet **RHAPSODIE 2***
   >> https://librairie.ademe.fr/air-et-bruit/6032-projet-rhapsodie-2.html

9. Roland Dauphin, Vivien Prevost, Philippe Dégeilh, Joris Melgar, Corrado Fittavolini, Alastair Smith, Cyrille Callu, Sofia Chrysafi, Renate Uitz-Choi, Kenneth Kar, ***Evaluation of plug-in hybrid vehicles in real-world conditions by simulation***, Transportation Research Part D: Transport and Environment, Volume 119, 2023, 103721, ISSN 1361-9209
   >> https://doi.org/10.1016/j.trd.2023.103721

10. ***Concawe – Welcome to the cars CO_2 comparator!***
    >> https://www.carsco2comparator.eu

11. ***Synthèse d'un catalyseur à base de zéolithe AFX contenant du palladium pour l'adsorption des NOx***
    >> Brevet WO2022243164
    Synthèse d'un catalyseur composite à base de zéolithe AFX-BEA contenant du palladium pour l'adsorption des Nox
    >> Brevet WO2022243165

12. ***Synthèse rapide d'un catalyseur comprenant une zéolithe de type structural AFX et au moins un métal de transition pour la réduction sélective de NOx***
    >> Brevet WO2020212354

Contact scientifique : philippe.degeilh@ifpen.fr

>> NUMÉRO 52 DE SCIENCE@IFPEN

Emissions du transport routier : une recherche intégrée pour la qualité de l’air !

Comme tous les secteurs concernés par l'électrification, celui du transport nécessite la conception de systèmes électriques performants et efficaces qui répondent à de multiples contraintes, telles que le coût et la compacité. Dans ce contexte, l'optimisation est devenue une étape primordiale du processus de conception de ces systèmes, en particulier pour les machines électriques.

Lors de la conception d'une machine électrique, les méthodes basées sur les éléments finis, reconnues pour leur précision et leur caractère générique, sont souvent utilisées pour simuler les performances. Cependant, du fait des temps de calcul relativement longs, l'utilisation de ces méthodes dans des boucles d'optimisation est pénalisante, a fortiori dans le cas d'algorithmes d'optimisation stochastique qui nécessitent eux-mêmes un nombre de calculs importants.

Des travaux de recherche sont menés au sein de la Direction « Mobilité et Systèmes »[1] afin de proposer de nouvelles méthodologies d'optimisation répondant à ce problème de temps de calcul. Ainsi, des approches telles que l'utilisation de modèles de substitution sont d'ores et déjà utilisées [1]. D'autres approches, telles que l'optimisation bayésienne[2] et l'optimisation multifidélité, sont également envisagées. En plus de la réduction du temps de calcul, ces approches pourraient conduire à une modélisation et une optimisation plus pertinente du système électrique étudié, en permettant une prise en compte plus complète des phénomènes physiques qui régissent son comportement.

Une fois la conception de la machine électrique réalisée, garantir sa bonne exploitation dans toutes les conditions de fonctionnement implique le développement et l'implémentation de lois de contrôle et de solutions de diagnostic afin de la commander au mieux.

L'approche globale développée et utilisée pour le contrôle et le diagnostic des machines électriques est illustrée à la figure 1.

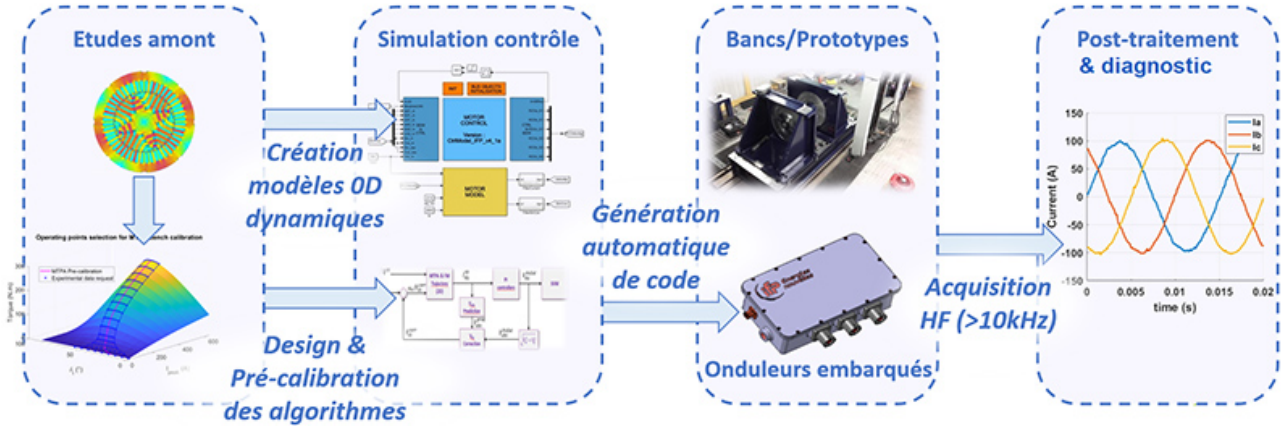


Figure 1 : Principe de l'approche globale du contrôle et diagnostic des machines électriques

Sur le plan du contrôle, un comportement optimal et robuste sur toute la plage de fonctionnement est assuré par des algorithmes dédiés, développés au sein de la direction. Ces algorithmes utilisent les données de conception ainsi qu'un système de génération automatique de code qui permet d'accélérer la phase d'implémentation de ces logiciels dans les cartes de contrôle des onduleurs

développés également par l'IFPEN.

Au sujet du diagnostic, des travaux de recherche sont menés pour développer des indicateurs de défauts permettant de suivre l'état de santé des stators et des rotors :

- au niveau des stators, le principe est de surveiller le vieillissement de l'isolant pour anticiper l'apparition de graves défauts de court-circuits interspires. Aussi, une méthode utilisant une transformée en ondelette a-t-elle été développée pour identifier et localiser les défauts interspires naissants [2] ;

- concernant les rotors, il s'agit de surveiller les aimants pour détecter l'apparition de défauts de désaimantation et ainsi anticiper la baisse des performances des machines. Une approche par éléments finis nous a permis de développer un indicateur de ce type de défaut en utilisant la composante homopolaire des forces électromotrices [3].

Sur ces deux types de défauts, un gain en sensibilité de détection est attendu par une approche comportementale en zone haute fréquence, actuellement en cours de développement. Le travail mené porte sur la modélisation des phénomènes et sur le développement de méthodes de traitement de signal dédiées. De plus, pour obtenir un bon compromis entre temps de calcul et précision des résultats, des simulations hybrides, combinant des calculs par éléments finis et reposant sur des modèles de circuits électriques équivalents, ont été adoptées[3].

Les travaux de modélisation, d'optimisation, de contrôle et de diagnostic des machines électriques, conduits dans la direction « Mobilité et Systèmes », permettent de couvrir l'ensemble de la vie des machines électriques, depuis leur phase de conception en passant par leur mise en service, la validation de leur performance et jusqu'à la surveillance de leur fonctionnement en conditions réelles.

[1-] Par le département « Systèmes électriques et électroniques », en collaboration avec le département « Mathématiques appliquées » de la direction « Sciences et Technologies du Numérique ».
[2-] Thèse de Adan Reyes Reyes : *Contribution méthodologique au dimensionnement optimal et robuste des machines électriques dédiées aux chaines de traction VE et VEH.*
[3-] Thèse de Jérémy Creux: *"Modélisation hautes fréquences des machines synchrones à aimants, Application à la détection précoce des défauts inter-spires et des défauts de désaimantation".*

Références bibliographiques

1. A. R. Reyes, A. Nasr, D. Sinoquet and S. Hlioui, ***Robust design optimization taking into account manufacturing uncertainties of a permanent magnet assisted synchronous reluctance motor***, 2022 IEEE International Conference on Electrical Sciences and Technologies in Maghreb (CISTEM), Tunis, Tunisia, 2022, pp. 1-6.
   >> https://doi.org/10.1109/CISTEM55808.2022.10043885

2. N. Haje Obeid, A. Battiston, T. Boileau and B. Nahid-Mobarakeh, ***Early Intermittent Interturn Fault Detection and Localization for a Permanent Magnet Synchronous Motor of Electrical Vehicles Using Wavelet Transform***, in IEEE Transactions on Transportation Electrification, vol. 3, n^{o}. 3, pp. 694-702, Sept. 2017.
>> https://doi.org/10.1109/TTE.2017.2743419

3. J. Creux, N. H. Obeid, T. Boileau and F. Meibody-Tabar, ***Local Demagnetization Fault Detection in PMASynRM based on Finite Element Modeling and Characterisation***, IECON 2022 – 48th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Brussels, Belgium, 2022, pp. 1-6.
>> https://doi.org/10.1109/IECON49645.2022.9968829

Contacts scientifiques : andre.nasr@ifpen.fr - najla.haje-obeid@ifpen.fr

>> NUMÉRO 52 DE SCIENCE@IFPEN

Machines électriques : conception, optimisation, contrôle et diagnostic

Dans le cas des véhicules électrifiés, à batterie (électriques ou hybrides) ou à pile à combustible (PAC), les convertisseurs d'électronique de puissance (EdP) jouent un rôle majeur car ils y sont utilisés pour différentes fonctions. Ils servent par exemple à piloter des moteurs électriques, à gérer l'énergie à bord du véhicule ou à contrôler la recharge de la batterie de traction.

L'EdP est une électronique de conversion d'énergie électrique, par commutation de transistors semiconducteurs, pour laquelle le silicium (Si) est le matériau historique encore largement utilisé. Mais ces dernières années, la percée de nouveaux transistors plus sophistiqués, en particulier en matériaux carbure de silicium (SiC) et nitrure de gallium (GaN), a bouleversé le marché des composants de puissance tant leurs performances surpassent celles de leurs homologues à base de Si.

Ces nouveaux matériaux, dits à « large bande interdite » (WBG[1]) offrent de très bonnes performances en termes de rendement, de densité de puissance ou de vitesse de commutation, avec un impact bénéfique sur les pertes en puissance (figure 1).

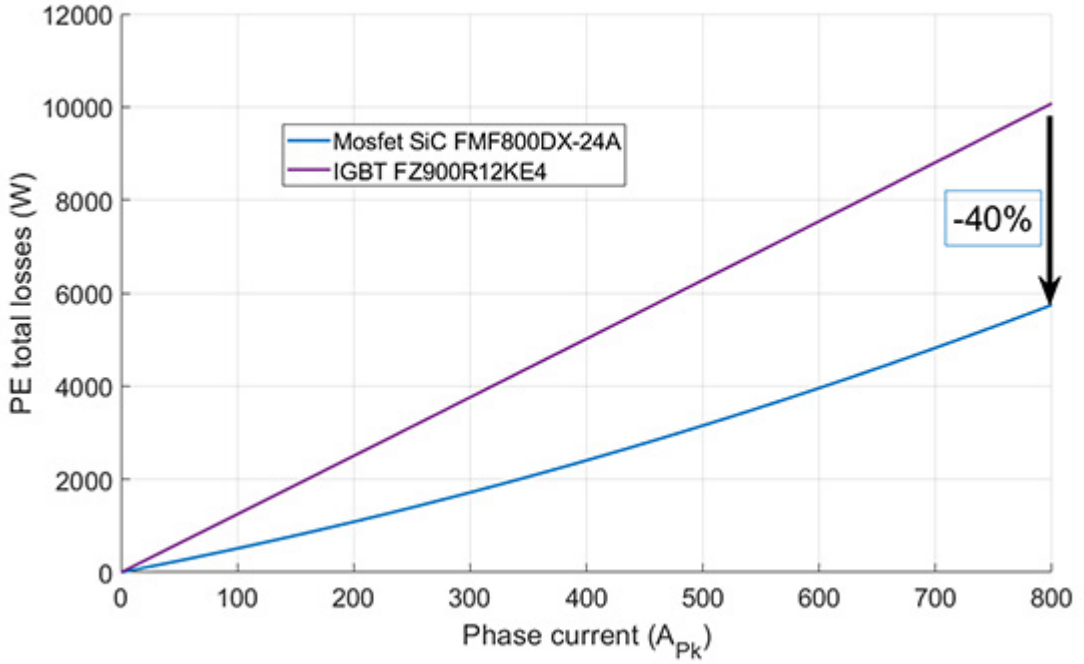


Figure 1 - Comparaison des pertes d'une carte électronique de puissance avec composants similaires en carbure de silicium (Mosfet SiC) et en silicium (IGBT) selon différents niveaux d'amplitudes de courants moteur électrique.

Cette rupture technologique s'accompagne toutefois de nouveaux défis que la Direction « Mobilité & Systèmes » cherche à relever par des travaux de recherche à des niveaux de maturité très variés, dans le cadre de projets partenariaux ou grâce à des thèses de doctorat.

Parmi les axes de recherche liés à l'EdP, nous pouvons citer :

- **la compréhension et la caractérisation des composants WBG dans un environnement système** : cet axe vise à caractériser les composants WBG en vue d'enrichir les modèles permettant leur étude au sein d'un système électrique [1]. IFPEN a noué pour cela un partenariat avec la société CGD (Cambridge GaN Devices) pour comprendre l'impact de l'implémentation de ces nouvelles technologies au sein des convertisseurs et d'en modéliser les effets parasites, car ceux-ci peuvent impacter fortement les performances des convertisseurs électriques, voire mener à leur détérioration. Un objectif complémentaire porte sur l'élaboration de nouvelles méthodes de tests dédiées aux WBG, en prenant en compte des profils de mission de plus en plus sévères, de manière à évaluer leur fiabilité ainsi que leurs mécanismes de défaut ;

- **les convertisseurs de puissance et les topologies innovantes** : sur cet axe, IFPEN s'implique dans l'élaboration de nouvelles architectures visant à explorer l'efficacité des composants WBG pour augmenter les densités de puissance massique et volumique des convertisseurs et répondre à des contraintes de durabilité des électroniques de plus en plus sévères. Dans ce cadre, des solutions d'onduleur de traction^2 [1] à base de composants en carbure de silicium (SiC) ont été élaborées (figure 2). IFPEN contribue également à la recherche de nouvelles architectures de conversion de puissance pour l'hybridation des systèmes batterie/PAC [2] dans le domaine du transport lourd et participe au développement de solutions prototypes permettant le pilotage de compresseurs électrifiés alimentant en air les PAC [3] ;

- **la gestion thermique et les nouvelles solutions de refroidissement** : les convertisseurs à base de composants Si sont généralement refroidis de manière indirecte via un dissipateur de type « plaque à eau ». Cependant, l'utilisation à leur plein potentiel des composants WBG peut générer localement des pertes de puissance de l'ordre de 1 kW/cm^2, c'est-à-dire dix fois supérieures à celles des puces Si. IFPEN explore donc de nouvelles solutions de refroidissement localisées de la puce semiconductrice, en s'attachant notamment à une meilleure compréhension du comportement thermique des composants implémentés au sein des cartes électroniques. L'objectif est d'en tirer un modèle capable de mieux prédire les températures de jonction des composants WBG, car celles-ci ne peuvent généralement pas être mesurées directement.

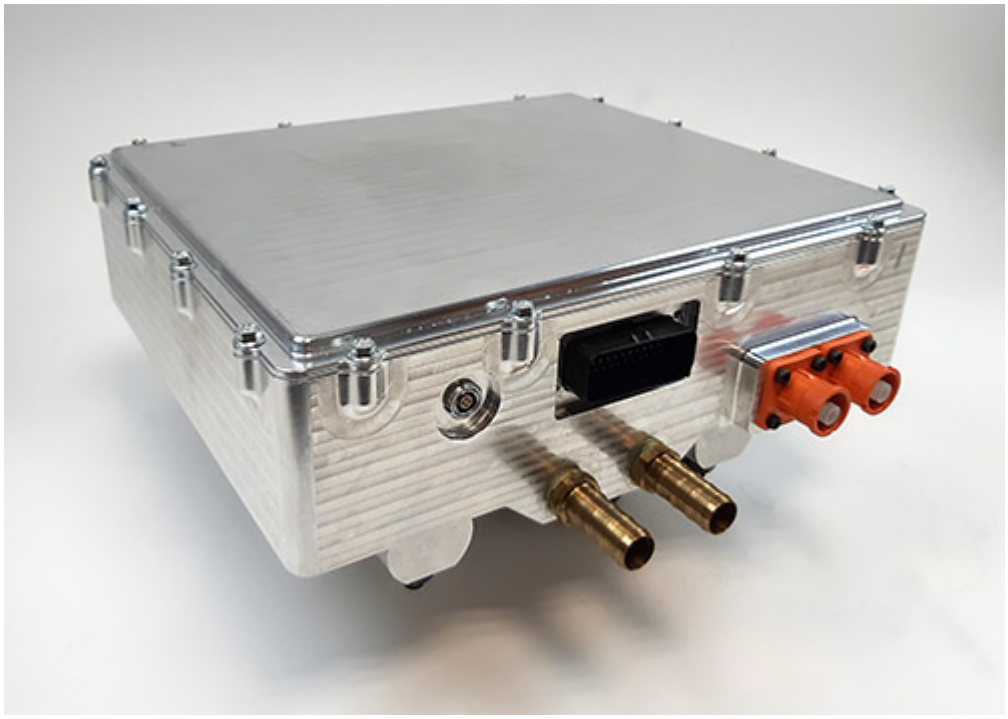


Figure 2 – Onduleur de traction IFPEN en technologie SiC pour applications automobiles à forte densité de puissance.

Tous ces travaux en cours sur l'EdP visent ainsi à améliorer les performances et la fiabilité des systèmes de conversion d'énergie qui implémentent les transistors de dernière génération, afin d'en exploiter tous les bénéfices dans le contexte de l'électrification des véhicules.

1- *Wide Band Gap.*
2- Organe de conversion d'énergie qui permet le pilotage du moteur électrique d'un véhicule électrifié à partir d'une source de tension continue telle que la batterie de traction.

Références bibliographiques

1. A. Battiston, L. Kefsi, M. Milosavljevic, A. Sabrie, ***High-Power / High-Voltage (250 kW / 750V) SiC-Based Inverter for Electric Vehicles Applications***, 2021 23rd European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'21 ECCE Europe), pp. 1-10, 2021.
   >> https://doi.org/10.23919/EPE21ECCEEurope50061.2021.9570699

2. Alexandre Battiston, ***Convertisseur d'énergie électrique apte à être connecté à deux sources d'alimentation et apte à la récupération d'énergie***, Brevet d'Invention FR3129544 (A1), Nov. 25, 2021.
   >> https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/080225320/publication/FR3129544A1?q=FR3129

3. F. D. De Sousa, A. Battiston, S. Pierfederic, F. Meibody-Tabar, ***Evaluation of the Magnetic Behavior of a Single Pole Pair Fe-Cr-Co-based Memory Motor Considering a Standstill Magnetization: Electrified Compressor Applications***, IEEE Transactions on Magnetics.
   >> https://doi.org/10.1109/TMAG.2022.3141895

Contact scientifique : alexandre.battiston@ifpen.fr

>> NUMÉRO 52 DE SCIENCE@IFPEN

L'électronique de puissance au cœur des enjeux de la mobilité électrique

La gestion thermique des moteurs électriques est un élément essentiel pour une mobilité décarbonée compétitive car un refroidissement plus efficace permet non seulement d'augmenter la densité de performance (puissance ou couple massique) des moteurs, mais aussi d'améliorer leur fiabilité opérationnelle en évitant les phénomènes de détérioration (notamment la désaimantation). Aussi, l'injection d'huile sur les parties les plus contraintes thermiquement (par exemple sur la tête de bobines statoriques) apparaît comme une solution prometteuse en vue d'améliorer la performance de refroidissement.

Le développement de tels systèmes doit reposer sur une conception et un dimensionnement optimaux, ce qui nécessite une connaissance détaillée des échanges thermiques et des coefficients de convection entre le liquide et les éléments à refroidir. Par ailleurs, les huiles utilisées pour le refroidissement des machines électriques ont des propriétés particulières (nombre de Prandtl élevé[1]) qui induisent de grandes différences entre les échelles caractéristiques de l'écoulement (> 1/10 mm) et de la thermique (< 1/10 mm), d'où une difficulté pour la compréhension des phénomènes et leur prédiction par des simulations numériques. De plus, les données actuellement disponibles proviennent d'essais de jets impactants avec de l'eau, et ne sont donc pas représentatives de la situation qui nous intéresse.

Pour pallier ce manque de données, une expérimentation basique avec une configuration simplifiée, où l'huile est projetée sur une plaque plane chauffée (figure 1a), a été mise au point et réalisée pour caractériser précisément le transfert de chaleur par convection dans cette configuration [1]. La température de surface a été enregistrée au moyen de thermocouples de haute précision et des techniques optiques avancées de fluorescence ont été déployées pour obtenir simultanément la température locale et l'épaisseur du film d'huile. La combinaison des données expérimentales, obtenues avec des résultats de simulation numérique de conduction de chaleur dans la plaque, a permis de caractériser le comportement thermique global, et en particulier le flux thermique local extrait de la plaque (figure 1b).

Cette méthodologie a été développée et utilisée dans le cadre d'une thèse[2] afin de caractériser l'évacuation de chaleur lors de l'interaction d'un jet liquide avec une plaque chaude, en fonction des conditions opératoires (débit d'injection, température de l'huile, etc.). Les essais ainsi réalisés ont abouti au développement de corrélations empiriques entre ces paramètres, très utiles pour la conception de nouvelles machines électriques.

La même méthodologie va désormais être appliquée dans des cas plus proches de l'application considérée, par exemple des géométries complexes comme des bobinages, afin de générer de nouvelles corrélations empiriques. Ces dernières seront essentielles au développement de modèles à la fois fiables et représentatifs pour décrire l'écoulement des fluides et l'échange de chaleur dans les moteurs électriques, tout en limitant les temps de calcul pour les bureaux d'études.

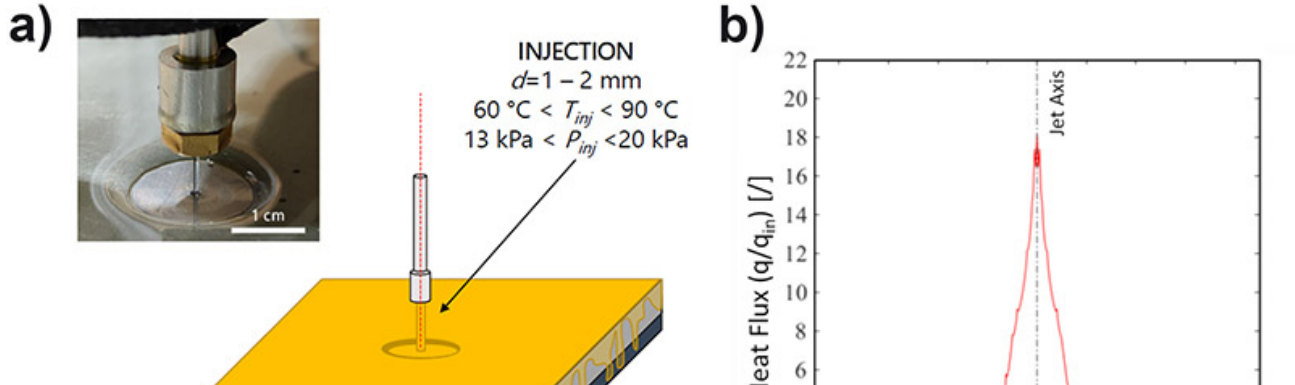


Figure 1: Essai de jet liquide impactant une plaque chaude.
1.a- Configuration expérimentale étudiée d'un jet liquide impactant une plaque chaude.
1.b- Résultat de la méthodologie développée, caractérisation du flux thermique extrait par l'impact du jet sur la plaque.

[1-] Nombre sans dimension, défini comme le rapport entre la viscosité cinématique (liée à la quantité de mouvement) et la diffusivité thermique (liée à la quantité de chaleur).
[2-] Intitulée « *Développement d'une méthodologie expérimentale pour caractériser les systèmes de refroidissement par liquide des moteurs électriques* ».

Référence bibliographique

1. Cornacchia, I., Pilla, G., Chareyron, B., Bruneaux, G., Kaiser, S., Poubeau, A. (2021, May). ***Development of an Experimental Methodology to Characterize Liquid Cooling Systems for Electric Motors***. In 2021 IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC) (pp. 1-7). IEEE.
   >> https://doi.org/10.1109/IEMDC47953.2021.9449572

Contact scientifique : michele.bardi@ifpen.fr

>> NUMÉRO 52 DE SCIENCE@IFPEN

Moteur électrique : le refroidissement à l'huile c'est plus difficile…

Numéro 52 de Science@ifpen - Spécial "Mobilité & Systèmes"
23 août 2023

Lien vers la page web :