

L'électrification des véhicules

Les travaux de l'IFP

Le secteur des transports est actuellement confronté à de nombreuses contraintes : la fluctuation du prix des carburants, le renforcement des normes antipollution, la nécessaire maîtrise des émissions de CO₂ et la réduction de la dépendance pétrolière. Aucune technologie n'apportera à elle seule une réponse à l'ensemble de ces défis. Mais parmi les solutions envisagées, l'électrification des véhicules présente un potentiel intéressant pour réduire la consommation de carburant, limiter l'impact sur l'environnement et diversifier les sources d'énergie. Le plan Véhicule décarboné lancé par le gouvernement prévoit l'émergence, d'ici à 2012, d'une offre de véhicules électriques et hybrides rechargeables.

Bénéficiant de compétences clés en technologies moteurs, modélisation et simulation, l'IFP a engagé des travaux importants en partenariat avec les industriels, pour parvenir à un développement et une mise sur le marché accélérés des véhicules hybrides.

Une solution pour optimiser la gestion de l'énergie à bord du véhicule

Les véhicules hybrides qui associent un moteur thermique, une machine électrique et leurs stockages d'énergie respectifs (réservoir de carburant et batterie) présentent un potentiel élevé en termes de réduction des émissions de CO₂. Cette association permet en effet de choisir le mode de propulsion optimal (thermique, électrique ou combiné) selon le cycle de conduite, et notamment de réserver l'utilisation du moteur thermique dans ses zones de bon rendement (en zone extra urbaine essentiellement). Les véhicules hybrides devraient donc connaître un essor sans précédent dans les prochaines décennies : les perspectives pour le marché mondial sont estimées entre 6 et 7 % des ventes à l'horizon 2018.

Une électrification croissante

La puissance électrique disponible à bord du véhicule pour les besoins de la motorisation va être progressivement augmentée et le choix des solutions va se multiplier. Le système d'hybridation légère et à faible surcoût, *stop&start*, va d'abord se développer. Il consiste à stopper le moteur thermique lors des arrêts du véhicule. Le gain en consommation de carburant (donc en émissions de CO₂) est de 5 à 7 % en cycle mixte et de 10 à 15 % en conduite urbaine. Une deuxième configuration, plus ambitieuse, baptisée *mild hybrid*, permet d'assister le moteur thermique pendant les phases motrices. Le gain de consommation est de l'ordre de 30 % en conditions urbaines. Enfin, la configuration *full hybrid*, celle de la Toyota Prius qui reste le modèle hybride par excellence, permet au véhicule de fonctionner en mode tout électrique sur de très courtes distances. « *Ce mode hybride offre le plus de possibilités d'optimisations de fonctionnement du moteur thermique puisqu'une grande part des situations défavorables (faibles régimes et charges du moteur thermique) peut être réalisée en mode tout électrique* », précise François Badin, Directeur Expert véhicules et motorisations hybrides à la direction Techniques d'applications énergétiques de l'IFP. Les gains en consommation atteignent 40 % en conditions urbaines, 10 à 20 % sur route mais restent quasi nuls sur autoroute. À moyen terme, les hybrides de 2^e génération, des véhicules hybrides rechargeables pouvant fonctionner en mode tout électrique sur des distances importantes (10 à 60 km) et rechargeables sur le réseau électrique (dits *plug-in*), devraient apparaître.

Par ailleurs, à long terme, des solutions de motorisation tout électrique avec une autonomie de 100 à 200 km sont envisagées, notamment en usage urbain et péri-urbain. Leur déploiement suppose la mise en place d'une infrastructure de recharge adaptée.

Selon le segment de marché et les usages visés, le choix s'orientera vers la solution offrant le meilleur compromis entre les gains en performance énergétique et en émissions de CO₂ et le surcoût du système embarqué et des infrastructures. Mais pour rendre ces technologies compétitives, il reste des enjeux majeurs relatifs au coût des équipements électriques ainsi qu'à leurs performances et à leur durabilité (batterie notamment).

L'IFP et l'hybride : une approche globale

Pour répondre à ces enjeux, l'IFP conduit des travaux de R&D appliqués à l'hybride, depuis le développement de simulateurs moteurs jusqu'à la réalisation de démonstrateurs. Les recherches se déclinent tant sur les véhicules hybrides de 1^{re} génération que sur les véhicules hybrides de 2^e génération rechargeables et les véhicules électriques urbains. Quel que soit le degré d'électrification, l'objectif est ambitieux : non seulement minimiser la consommation énergétique du véhicule mais aussi s'adapter aux futures normes d'émissions de polluants et préserver un agrément de conduite.

Concevoir des moteurs thermiques dédiés à l'hybride

L'IFP conduit des travaux de recherche sur les moteurs thermiques dédiés afin d'exploiter les degrés de liberté offerts par l'hybridation.

« Il s'agit en premier lieu de tirer profit de la très bonne complémentarité, en termes de couple, entre le moteur électrique et le moteur thermique » souligne Pierre Leduc, chef de projet "Motorisations hybrides" à la direction Techniques d'applications énergétiques de l'IFP. Le recours au moteur électrique, en particulier dans les configurations de conduite où la demande de puissance est faible, permet de réserver l'utilisation du moteur thermique dans des zones plus restreintes de fonctionnement où le rendement va pouvoir être optimisé (augmentation du taux de compression pour les moteurs à essence, réduction des contraintes sur la suralimentation pour le moteur diesel).

Par ailleurs, avec des arrêts et redémarrages plus fréquents - une fois par minute en moyenne en ville -, le moteur à combustion dans un véhicule hybride nécessite une gestion adaptée pour maintenir un bon agrément de conduite (modification du taux de compression apparent *via* la distribution variable, par exemple).

Enfin, les problèmes de dépollution doivent être traités de façon spécifique en tenant compte notamment des perturbations induites par les phases d'arrêt du véhicule et de la sollicitation renforcée du moteur thermique quand il est en fonctionnement. Dans le cas du moteur diesel, les compromis de réglages doivent être ré-optimisés pour compenser un risque accru d'émissions de NOx.

Des maquettes virtuelles aux essais sur banc réels : l'approche systématique de l'IFP

La complexité des véhicules hybrides, qui associent deux systèmes de motorisations et de stockage avec une grande variété d'architectures, nécessite une prise en compte très précoce de l'intégration et de la gestion optimisée de l'ensemble de ses composants. Pour réduire les coûts et délais de développement, l'IFP a adopté une méthode innovante, associant maquettes virtuelles *via* la modélisation et moyens d'essais physiques, et qui s'applique tant aux composants (batterie, machine électrique) qu'à la gestion de l'énergie du véhicule. Elle repose dans un premier temps sur la conception de modèles mathématiques

fiables, validés sur des bancs d'essais expérimentaux où les prédictions sont comparées aux mesures. Ces modèles permettent d'optimiser le dimensionnement et les caractéristiques des différents composants, voire l'architecture complète du véhicule. Ces modèles sont ensuite traduits en algorithmes de contrôle, autrement dit en logiciels, intégrés dans des contrôleurs embarqués qui prédisent et pilotent le fonctionnement du composant en temps réel.

Cet algorithmique en temps réel constitue une des clés du développement à grande échelle des véhicules hybrides : elle permet de contrôler, à tout moment et pendant toute leur durée de vie, la charge des batteries mais aussi la répartition de la puissance entre moteur thermique et machine électrique, et finalement l'architecture complète du véhicule. « *Nous développons la chaîne d'ingénierie complète, de la simulation jusqu'aux phases expérimentales, en couplant outils de simulation et bancs d'essais réels de moteurs thermiques, mais aussi de batteries ou de machines électriques* » résume Gilles Corde, Chef du département Automatique, Traitement du signal et Informatique Temps réel à la direction Technologie, Informatique et Mathématiques appliquées de l'IFP. Des modifications paramétriques des composants peuvent être opérées directement dans les logiciels au banc moteur (puissance du moteur électrique, masse du véhicule, etc.) et leurs impacts sur les émissions de CO₂ et l'agrément de conduite immédiatement analysés. « *Grâce à nos outils mathématiques, ajoute-t-il, nous pouvons utiliser la simulation à chacune des étapes et quantifier les performances, autrement dit comparer différentes architectures et guider le choix des composants.* »

Mettre au point des modèles fiables et précis de batteries

Dans les véhicules hybrides, la batterie assure le stockage intermittent et réversible de l'énergie. Pour optimiser la gestion de cet équipement complexe, il est primordial de connaître, précisément et à chaque instant, l'état de réserve d'énergie de la batterie, ce qu'on appelle "l'état de charge", et d'en tirer parti de manière à préserver au maximum la "santé" de la batterie, autrement dit sa durée de vie. « *L'enjeu des recherches actuelles est de mieux connaître l'état de charge de la batterie, ce qui permettrait d'étendre sa plage de fonctionnement, et donc de minimiser consommation de carburants et émissions de CO₂ en limitant le poids des batteries*, explique Valérie Sauvant-Moynot, responsable de projets batterie à la direction Chimie et physico-chimie appliquée à l'IFP. *À terme, avec une estimation fiable de l'état de charge et de l'état de santé, on peut espérer allonger la durée de vie de la batterie pour la même autonomie du véhicule, donc réduire le coût*».

Pour atteindre cet objectif, les chercheurs de l'IFP développent depuis 2007 des modèles capables de décrire les phénomènes électrochimiques et thermiques mis en oeuvre dans des batteries Ni-MH (nickel métal hydrure) et Li-ion (lithium ion) en fonctionnement. Pour tester ces modèles, l'IFP s'est doté de moyens performants : un "banc de puissance" à l'échelle des caractéristiques de fonctionnement des batteries commerciales (500V -500A) et 4 bancs d'essais permettant de réaliser des tests sur des cellules (50 V - 200A) « *Notre modèle prédit la tension de la batterie de la Prius à 2% près dans un usage usuel avec contrôleur embarqué, du jamais vu !* » affirme Valérie Sauvant-Moynot.

Estimer l'état de charge des batteries en temps réel

Les mathématiciens de l'IFP ont ensuite transformé ces modèles électrochimiques en algorithmes de contrôle pour estimer l'état de charge de la batterie en temps réel, par conséquent la puissance disponible à chaque instant. Ces estimateurs ont été inclus dans le contrôleur de batterie, ce qu'on appelle le BMS, *Battery Management System*, destiné à être embarqué à bord du véhicule. Ces algorithmes seront d'abord validés sur des outils de

simulation, puis dans la réalité, sur une plate-forme d'essai unique développée à l'IFP, qui associe le banc de puissance batterie de l'IFP et un contrôleur BMS. *« C'est un outil de comparaison temps réel parmi les plus performants se réjouit Valérie Sauvart-Moynot ».*

Mettre au point des stratégies de contrôle pour optimiser la gestion de l'énergie en temps réel

Au-delà de l'état de charge de la batterie, il est nécessaire d'optimiser la gestion d'ensemble de l'énergie à bord du véhicule hybride. Autrement dit, il s'agit de mettre au point des technologies permettant d'opérer le choix, en temps réel et en fonction de l'usage du véhicule, de la répartition de puissance entre le moteur thermique et la machine électrique.

« À cette fin, l'IFP a développé depuis 2007 un logiciel de gestion de l'énergie en temps réel, basé sur des "lois de contrôle optimales", le même qui est ensuite utilisé dans HyHIL, explique Antonio Sciarretta, Expert en Véhicule hybride et gestion de l'énergie à la direction Technologie, Informatique et Mathématiques appliquées. Le logiciel nous permet d'abord d'estimer, par simulation, l'apport de tel ou tel composant de l'architecture, en termes de réduction de la consommation, dans des conditions données de conduite. Seconde étape : en implémentant nos modèles dans le contrôleur embarqué d'un véhicule hybride, nous comparons nos prévisions aux véritables mesures d'émissions de CO en temps réel avec une conduite qui n'est, cette fois, pas connue d'avance ».

Optimiser le dimensionnement de la machine électrique

À l'instar du moteur thermique, la machine électrique entraîne les roues du véhicule. Elle est aussi génératrice de courant pour la batterie. C'est un équipement qu'il va falloir également caractériser et modéliser pour l'optimiser. L'IFP s'est doté d'un banc de caractérisation générique qui permettra de tester des machines électriques commerciales et prototypes. *« Notre banc sera adapté à tout type de machine électrique, jusqu'aux plus petites qui tournent à 20 000 tours/minute (la machine électrique principale de la Prius tourne à 6 000 tours/minute) »,* précise Benoist Thirouard, chef du département Analyse système moteurs à la Direction Techniques d'applications énergétiques à l'IFP. Les données (rendement, comportement thermique, puissance maximale accessible en phase de dépassement ou en côte, etc.) serviront à valider un modèle, en cours de développement avec le Laboratoire d'Électromécanique de l'Université de Technologie de Compiègne (LEC) puis à développer des algorithmes de contrôle temps réel.

Optimiser l'architecture globale du véhicule hybride : du véhicule hybride virtuel HyHIL au prototype réel

« Les algorithmes de contrôle de la machine électrique, comme ceux des batteries et de la gestion de l'énergie, enrichissent, au fur et à mesure de leur aboutissement, nos outils de simulation temps réel. Ils nous permettent d'optimiser l'architecture complète du véhicule, et d'envisager la conception de prototypes hybrides » conclut François Badin.

- La plate-forme semi-virtuelle de tests HyHIL

Cette plate-forme permet de reproduire et d'évaluer l'architecture complète de véhicules hybrides. Autrement dit, il s'agit de simuler, d'évaluer les choix de composants électriques et d'étudier leur répercussion tant sur la consommation, les émissions de polluants que l'agrément de conduite, avant toute expérimentation sur véhicule. HyHIL associe un banc d'essais moteur thermique qui intègre un gestionnaire d'énergie embarqué à des simulations en temps réel.

HyHIL a été mise en place dans le cadre d'un programme collaboratif lancé en avril 2008, labellisé Predit et bénéficiant du soutien du Fonds unifié interministériel (FUI) et du pôle de compétitivité Mov'eo. Coordonné par la société D2T, le projet est mené en collaboration avec Renault, le laboratoire de génie électrique de Grenoble et LMS. « Trois architectures hybrides ont été testées sur plusieurs cycles d'homologation et validées : un mode thermique pur, un mode stop&start et un mode full hybrid précise Gilles Corde ». Les travaux se poursuivent sur une architecture plus complexe, avec des modèles temps réel plus fins représentant une Renault hybride 4 roues motrices. HyHIL devrait permettre de réduire significativement la phase de conception et de développement d'une nouvelle architecture hybride.

- Réaliser des démonstrateurs véhicules

Sur la base de modèles existants, et le plus souvent en partenariat avec des industriels, l'IFP met au point des démonstrateurs destinés à tester sur véhicule et en conditions réelles de fonctionnement les technologies qu'il développe dans le domaine des hybrides.

L'IFP a ainsi mis au point en 2006, avec Gaz de France, un prototype hybride au gaz naturel sur la base d'une Toyota Prius, le véhicule *full hybrid* le plus optimisé du marché, avec des émissions de polluants conformes à la norme Euro 4 et des émissions de CO₂ très faibles, de moins de 75 g/km. En avril 2008, dans le cadre d'un projet du Predit en partie financé par l'Ademe, les chercheurs de l'IFP ont développé un prototype de Smart hybride au gaz naturel, en collaboration avec Gaz de France, l'Inrets et Valeo. De type *mild hybrid*, le véhicule, baptisé Vehgan, respecte la future norme de polluants Euro 5 et émet 80 g/km de CO₂, soit 32 % de moins que le modèle essence.

L'IFP au cœur de la recherche collaborative

« Il y a un réel foisonnement autour de la thématique des véhicules hybrides et électriques, et des batteries en particulier. L'IFP participe à de nombreux projets qui réunissent partenaires industriels et académiques, et dont nous espérons voir les résultats valorisés rapidement auprès des constructeurs automobiles » note Valérie Sauvant-Moynot.

L'IFP est notamment impliqué dans deux projets dans le cadre du Fonds démonstrateurs recherche de l'Ademe :

- ELLISup, piloté par Irisbus, a pour objectif de développer deux types de démonstrateurs avec leurs stations de recharge : un bus hybride équipé de batteries adaptées à la recharge en fin de ligne, et un bus tout électrique permettant d'atteindre un coût d'exploitation proche de celui du diesel.
- Vel'roue, avec Michelin et Renault, vise à étudier la faisabilité d'un véhicule utilitaire bi-mode équipé de moteurs-roues sur le train arrière.

Par ailleurs, l'IFP participe depuis 2007 au projet Simstock, un projet de l'Agence nationale de la recherche (ANR), coordonné par LMS et mené avec 15 partenaires dont Batscap, PSA Peugeot Citroën, Renault, Saft et Valeo. L'objectif est d'étudier le vieillissement des batteries et de fournir aux industriels les modèles qui leur manquent pour prédire leur durée de vie dans des conditions réelles d'utilisation. Depuis 2008, l'IFP coordonne un autre projet de l'ANR, ALIDISSI, labellisé par le pôle de compétitivité Axelera. Mené en collaboration avec le CEA, le CNRS et la PME Material Mates, il a pour but de mettre au point des outils de diagnostic de l'état de charge et de l'état de santé de batteries lithium-ion en fonctionnement, sur la base de mesures de l'impédance électrique. Embarqués dans le véhicule, ces dispositifs de mesure constitueraient de véritables capteurs de charge.

Mov'eo-DEGE : plate-forme de R&D pour le développement des véhicules hybrides et électriques à Versailles Satory

Le projet Mov'eo-DEGE vise à construire une plate-forme technologique d'intégration permettant d'accélérer les développements et la validation de systèmes hybrides et électriques. Soutenu par le pôle de compétitivité Mov'eo et par les industriels (PSA Peugeot Citroën, Renault, Valeo, D2T) le projet rassemble les principaux acteurs publics du domaine (IFP, CETIM, INRETS et Université de Versailles Saint-Quentin en Yvelines). Cette plate-forme sera pourvue des moyens d'essais et de modélisation permettant de caractériser en performances, robustesse, durée de vie et mode de défaillance les différents composants de ces véhicules, en reproduisant au plus près les conditions de fonctionnement dans l'usage réel. « *De la simulation à l'expérimentation, nous aurons tous les moyens à disposition pour tester et optimiser composants et architectures hybrides* », note François Badin.