

Comment l'IFP relève le défi du véhicule décarboné ?

Olivier Appert, Président de l'IFP
Philippe Pinchon, Directeur Moteurs-Energie de l'IFP

Dans un contexte de volatilité des prix du pétrole et de changement climatique, le secteur des transports est confronté à un double défi : diversifier les sources d'énergie et réduire la consommation et les émissions de CO₂. Ils ne pourront être relevés que par la mise en place d'un "bouquet" de différentes solutions technologiques conduisant à des gains croissants en émissions de CO₂. Aux côtés de l'utilisation des biocarburants et de l'optimisation des motorisations conventionnelles, l'électrification progressive des véhicules présente un potentiel important pour optimiser la gestion de l'énergie. Bénéficiant de compétences clés en technologies moteur, modélisation, simulation et carburants, l'IFP est engagé, aux côtés des industriels, dans la recherche sur le véhicule dé-carboné.

Vers un marché complexe très segmenté

Vers quel modèle de "mobilité motorisée dé-carboné" peut-on évoluer à court et moyen termes ? Les pistes de réflexion concernent tant les motorisations et les sources d'énergie que l'organisation des transports et l'évolution des comportements individuels. « *Concernant les technologies, une seule certitude, affirme Olivier Appert : il y aura un panel de solutions diversifiées, adaptées à différents segments de marché, tant du point de vue des technologies que du point de vue régional. Il n'y a pas de panacée. Un modèle unique, correspondant à tous les besoins et tous les marchés, est un rêve qui appartient désormais au passé. Les solutions les plus adaptées au marché français ne seront probablement pas les mêmes que celle adaptées aux marchés brésilien, allemand, italien ou américain* ». On pourra trouver ici un véhicule dédié aux déplacements urbains et aux centres-villes en fonction de normes locales, là un autre adapté au transport routier ou pour des flottes captives.

Les différentes configurations possibles sont nombreuses, à commencer par les sources d'énergie primaire utilisables : fossiles (pétrole, gaz naturel, charbon) mais aussi renouvelables comme la biomasse. Ces sources d'énergie peuvent être embarquées dans le véhicule sous de multiples formes (essence, gazole, GPL, biocarburants, carburants de synthèse et GNV). Quant aux deux vecteurs énergétiques, hydrogène et électricité, ils présentent les mêmes avantages en termes d'autonomie du véhicule; « *mais l'hydrogène ne sera pas utilisé dans les transports avant 25 ou 30 ans car il se heurte à de nombreux défis, en termes de production, distribution et de stockage à bord des véhicules* » précise Olivier Appert. Enfin, quelle qu'elle soit, cette énergie embarquée peut être transformée dans le véhicule en énergie mécanique par divers systèmes de motorisation, à combustion interne comme dans la plupart des véhicules actuels, mais aussi électrique ou hybride.

De nombreuses solutions de véhicules électrifiés

« La situation actuelle qui repose à 97 % sur le moteur à combustion interne alimenté par des carburants pétroliers est en train d'évoluer, note Philippe Pinchon, directeur du Centre de résultats Moteurs-Energie de l'IFP. Nous observons un développement important des biocarburants et du gaz naturel, même si cela reste encore marginal en volume au niveau mondial, et plus récemment de l'électricité. La puissance électrique disponible à bord du véhicule pour les besoins de la motorisation va être progressivement augmentée ».

Le véhicule électrique présente de nombreux atouts : aucune émission polluante directe, de faibles émissions sonores, une chaîne de traction à haut rendement, des sources d'énergie primaire variées

et des émissions de CO₂ potentiellement très faibles si l'électricité est produite à partir d'énergie renouvelable, nucléaire ou fossile avec captage et stockage du CO₂. Les verrous technologiques restent néanmoins nombreux, en première ligne desquels les batteries qui posent des problèmes tant en termes d'autonomie que de coût. Autre défi de taille : la création d'une infrastructure de recharge rapide, indispensable pour le développement d'un parc automobile électrique d'envergure, pour pallier les 8 à 12 heures de recharge nécessaires sur le réseau classique.

Entre les véhicules thermiques courants et ces véhicules tout électrique se développent les véhicules hybrides qui se concrétisent par des solutions très variées. Selon leur configuration, et essentiellement les caractéristiques de leur batterie, les différents modèles permettent une autonomie électrique qui peut aller jusqu'à 150 kilomètres mais au prix d'un surcoût de l'ordre de 18000 euros. Les avantages en termes de réduction de consommation de carburant et donc d'émissions de CO₂ sont fonction de cette électrification plus ou moins importante : 3 à 7 % pour les modèles *Stop&Start* qui stoppent le moteur thermique à l'arrêt du véhicule et redémarrent grâce à une puissance électrique embarquée de 2 à 4 kW ; 20 à 35 % pour les modèles *Full hybrid* capables de fonctionner en mode tout électrique sur de très courtes distances, entre 1 et 5 kilomètres, grâce à une puissance embarquée de l'ordre de 50 kW et une récupération d'énergie électrique lors du freinage du véhicule. Pour cette configuration, le surcoût de la batterie est estimé entre 2500 et 5000 euros. Enfin, dernière configuration en lice, souvent présentée comme les véhicules hybrides de seconde génération, des modèles rechargeables sur le réseau pourraient fonctionner en mode tout électrique en usage urbain par exemple et réduire les émissions de CO₂ lors de ces trajets de 50 à 90 % selon la source d'énergie électrique utilisée.

Des solutions plus ou moins avantageuses selon la source d'électricité

Évaluer et comparer ces différentes solutions suppose de comptabiliser les émissions de CO₂ de la production de la source d'énergie primaire à son utilisation, "du puits à la roue". Plus généralement, ces analyses de cycle de vie (ACV) du véhicule permettent de mesurer leur empreinte énergétique, depuis la production des matières premières jusqu'au recyclage du véhicule, en passant par son fonctionnement. « *Nous avons effectué ce calcul pour différentes configurations de véhicules hybrides et électriques comparés à une berline moyenne diesel de 1100 kg qui émet 130 g/km d'équivalent CO₂* » explique Philippe Pinchon. Résultat : mis à part le cas où l'électricité est produite à partir du charbon comme en Inde ou en Chine, cas qui aboutit à un accroissement des émissions, toutes les solutions hybrides et électriques sont bénéfiques.

Mais les marges de progrès sont très variables selon l'origine de l'électricité. Les émissions de CO₂ les plus faibles, sous la barre des 20 g/km, sont obtenues en France dans un contexte d'électricité d'origine nucléaire, pour un véhicule électrique ou un véhicule hybride rechargeable utilisant un biocarburant de deuxième génération (éthanol dans le cas de cette étude). En moyenne, en Europe, des réductions d'émissions de 50% sont possibles avec des voitures électriques. En ce qui concerne les véhicules hybrides, les gains en moyenne sur cycle d'homologation européen se situent entre 15 et 45% selon le carburant utilisé par le moteur thermique, avec un avantage au gaz naturel par rapport au diesel ou à l'essence.

Quel impact en termes de coûts ?

« *Nous avons comparé les coûts associés à cette berline moyenne diesel avec ceux, d'une part, d'un véhicule électrique d'une autonomie de 150 km et d'autre part, d'un véhicule hybride rechargeable avec 25 km d'autonomie électrique* » ajoute Philippe Pinchon. Des calculs basés sur une batterie à 600 €/kWh, coût actuel, un carburant à 1,1 €/litre et une électricité à 0,1 €/kWh, taxes incluses. Selon ces évaluations, le coût d'acquisition d'un véhicule électrique serait deux fois plus élevé qu'un véhicule thermique, en grande partie en raison du prix important de la batterie, celui d'un véhicule hybride serait 30% plus élevé. « *Néanmoins, souligne-t-il, si l'on prend en compte les coûts d'usage en*

termes d'énergie et de maintenance, l'écart de prix se réduit à 30 % entre véhicule électrique et thermique, ce qui est l'ordre de grandeur des aides à l'achat actuelles, et les coûts deviennent identiques entre le véhicule thermique et l'hybride rechargeable. » En poursuivant ce raisonnement, si l'on parvient à réduire d'un facteur deux le coût des batteries, à 300€/kWh, objectif ambitieux visé par les fabricants, et dans le contexte inéluctable d'augmentation des prix du carburant (évalué pour cette analyse à 1,5€/l sur la base d'un baril à 150 dollars), le véhicule électrique pourrait à terme devenir concurrentiel, comparable au coût d'usage d'un véhicule hybride rechargeable, à condition toutefois que la batterie puisse durer toute la vie du véhicule.

Finalement, le surcoût le moins important (entre 200 et 5000 €) concerne le véhicule hybride, associé à des réductions d'émissions de CO₂ très variables, entre 3 et 40 % . Le meilleur rendement étant celui du *Full hybrid*, à l'instar de la Prius de 3^{ème} génération qui émet 89 grammes de CO₂ par kilomètre. Des réductions d'émissions jusqu'à 90% sont envisageables avec des véhicules électriques, sous réserve d'une source d'électricité peu émettrice, mais au prix d'un surcoût élevé (entre 15000 et 18000 €). Entre ces deux solutions, des véhicules hybrides rechargeables présentent le meilleur compromis.

Beaucoup reste à faire en recherche et développement

En tout premier lieu, les batteries dont la densité d'énergie et de puissance doit être augmentée et le coût abaissé tout en assurant les meilleures conditions de sécurité nécessitent encore beaucoup de travaux de R&D. Les batteries lithium-ion et lithium-polymère constituent un réel progrès en termes de puissance embarquée comparées aux batteries lithium-métal-hydrure. Mais elles sont plus coûteuses et posent plus de problèmes de sécurité. Par ailleurs, il faut s'interroger sur la disponibilité des réserves en lithium.

Des progrès doivent aussi être réalisés sur le moteur électrique lui-même mais aussi certains composants auxiliaires comme la climatisation. Autre point clé, le superviseur du véhicule, véritable cerveau qui gère l'énergie à bord, les systèmes de motorisation, le freinage et la communication entre les différentes infrastructures. De fait, les architectures des véhicules hybrides sont complexes. De nombreux modes de fonctionnement sont possibles, du 100 % thermique au 100 % électrique en passant par la récupération d'énergie au cours du freinage où l'inertie du véhicule permet de recharger la batterie. Les deux systèmes de motorisation (thermique et électrique) peuvent aussi être utilisés en même temps, "en parallèle", pour disposer d'un supplément de puissance. « *Nous travaillons sur des moteurs thermiques beaucoup moins puissants donc moins consommateurs et moins polluants, pour lesquels le complément de puissance dans certaines phases de conduite peut être apporté par le moteur électrique* » précise Philippe Pinchon. La batterie peut également être rechargée à partir du moteur thermique, lorsque le véhicule est en circulation. Le moteur thermique peut par ailleurs servir exclusivement à charger la batterie qui alimente un moteur électrique entraînant le véhicule. On parle alors d'architecture "en série". Enfin, comme sur la Prius de Toyota, le véhicule peut associer ces deux architectures hybrides, série et parallèle.

Accélérer la mise sur le marché des véhicules électrifiés

« *Le risque, face à cette complexité d'architectures, est que les délais de mise en production de ces véhicules soient considérablement accrus*, prévient Philippe Pinchon. *C'est la raison pour laquelle nous consacrons l'essentiel de nos moyens à accélérer la mise sur le marché des véhicules électrifiés, que ce soit en termes de conception à l'aide de maquettes virtuelles, autrement dit de simulations sur ordinateur, qu'en termes de validation sur des bancs d'essais* ». C'est dans cet objectif qu'est développé depuis 2008 une plate-forme semi-virtuelle de test, baptisée HyHIL, en collaboration avec la société D2T, Renault, le laboratoire G2ELAB et LMS. Labellisé Predit et bénéficiant du soutien du Fonds unifié interministériel (FUI) et du pôle de compétitivité Mov'eo, HyHIL permet de tester un

moteur thermique réel, dans l'environnement d'un véhicule hybride virtuel, par le biais de simulations en temps réel de la chaîne de motorisation, du contrôle électronique, des batteries, du comportement du véhicule et même du conducteur. À la clé : une phase de conception et de développement de nouvelles architectures hybrides significativement réduite. Cela permet aussi de mettre au point les logiciels du superviseur embarqué pour assurer la gestion de l'énergie à bord, élément essentiel pour prendre, à chaque instant, les meilleures décisions en fonction des circonstances pour optimiser la charge de la batterie, diminuer la consommation et assurer le meilleur agrément de conduite.

Côté batteries, les chercheurs de l'IFP ont développé des modèles détaillés de simulation de leur fonctionnement, capables de prédire leur durée de vie et leur état de charge, comme si elles étaient en usage réel. Ces modèles ont été validés sur des bancs d'essais permettant de simuler le fonctionnement des batteries commerciales, jusqu'à 500 ampères et 500 volts soit une puissance électrique de 120 kW, le tout entre -40°C et +60°C. L'IFP a par ailleurs mis au point des logiciels de contrôle électronique du calculateur des batteries qui permettent de préserver leur durée de vie .

Enfin, l'IFP est un acteur majeur du projet de plate-forme de R&D Mov'eo DEGE qui réunira, sur le site de Versailles Satory, l'ensemble des moyens d'expérimentation et de calcul pour accélérer le développement et la validation des véhicules hybrides et électriques. Cette plate-forme est soutenue par le pôle de compétitivité Mov'eo et par les industriels (D2T, PSA Peugeot Citroën, Renault, Valeo) et rassemble les principaux acteurs publics du domaine (IFP, Inrets, Cetim et Université de Versailles Saint-Quentin-en-Yvelines). Ces moyens d'essais devraient permettre de proposer des méthodes normalisées de qualification des composants les plus critiques.

Les réalisations de l'IFP dans le domaine des véhicules hybrides

L'IFP a participé à un certain nombre de projets concernant l'électrification des véhicules, comme l'optimisation et la calibration du moteur diesel HDI de PSA en 2006-2007 qui sera à la base du véhicule hybride que le constructeur sortira sur le marché en 2011 ; comme le véhicule *Full hybrid* au gaz naturel développé en 2006 avec GDF Suez à partir d'un modèle Prius et qui a atteint des émissions de CO₂ de 76g/km, encore inégalées dans cette catégorie de véhicules ; ou encore comme le *Micro hybrid* Vehgan au gaz naturel, développé entre 2006 et 2008 avec GDF Suez, Valeo, l'Inrets et l'Ademe sur la base d'une Smart avec des émissions de CO₂ égales à 84 g/km.

L'IFP est aussi impliqué dans deux projets conduits dans le cadre du Fonds démonstrateurs recherche de l'Ademe. Le projet VEL ROUE, avec Michelin et Renault, vise à étudier la faisabilité d'un véhicule utilitaire léger hybride rechargeable bi-mode, capable de fonctionner en mode 100 % électrique sur le train arrière et en mode 100 % thermique sur le train avant, ce qui correspondrait parfaitement aux besoins de véhicules de livraison. Le projet ELLISUP, piloté par Irisbus, vise quant à lui à développer deux démonstrateurs de bus avec leur station de recharge : un bus électrique et un bus hybride à recharge rapide (environ une heure).

L'IFP mène également des projets sur fonds propres comme Flex Hybrid, un projet de véhicule multi carburants et multi énergie, lancé en 2008 pour 2 ans. Il s'agit de concevoir une plate-forme d'essais roulante permettant de tester différentes solutions énergétiques, incluant les batteries, l'électronique de puissance, les lois de contrôle, le carburant, etc.