

Hybridation de l'énergie pour les transports

Jeudi 22 octobre 2009

Allocutions d'ouverture	3
Laure REINHART Présidente d'Ile de Science Alain BRAVO Directeur Général de Supélec	
Quelques enjeux du véhicule électrique	5
Gonzalo HENNEQUET Direction des Technologies Avancées de l'Automobile Renault	
Questions/Réponses relatives à l'intervention de M. Hennequet	8
Les motorisations hybrides. Etat des lieux, enjeux et perspectives.	10
Franck BRIAULT PSA	
Questions/Réponses relatives à l'intervention de M. Briault	12
Les systèmes hybrides Systèmes moteurs et électriques	14
Paul ARMIROLI Valeo-VEES	
Questions/Réponses relatives à l'intervention de M. Armiroli	16
Hybridation des véhicules industriels	18
Abderrahmane HAMMAR PVI	
Questions/Réponses relatives à l'intervention de M. Hammar	20
Mutation de l'énergie hydraulique vers l'énergie électrique pour les avions	23
Florent NIERLICH Messier Bugatti	
Questions/Réponses relatives à l'intervention de M. Nierlich	27
Infrastructure hydrogène pour une mobilité durable	29
Françoise BARBIER Air Liquide	

Questions/Réponses relatives à l'intervention de Mme Barbier	32
L'énergie à bas carbone sur le campus du Plateau de Saclay	34
Jean-Marc AGATOR Pôle d'animation scientifique Climat-Energie-Environnement CEA	
Questions/Réponses relatives à l'intervention de M. Agator	
Véhicule : accès à l'énergie et au réseau, approche système	35
Laurent SCHMITT Alstom Power	
Questions/Réponses relatives à l'intervention de M. Schmitt	37
Allocution de clôture	39
Jean-Claude VANNIER Chef du Département d'Electrotechnique et de Systèmes d'Energie Supélec	

Allocutions d'ouverture

Laure REINHART
Présidente d'Ile de Science

Je vous remercie d'être si nombreux dans cet amphithéâtre de Supélec pour traiter du sujet très important de l'hybridation dans les transports. L'association Ile de Science rassemble, depuis plus de trente ans sur le Plateau de Saclay, vingt-cinq établissements publics et privés qui contribuent à la recherche. Nous leur donnons ainsi l'occasion de débattre de sujets transverses autour des grandes préoccupations scientifiques ou industrielles. Le long chemin parcouru pour faire du Plateau de Saclay un haut lieu de la recherche mondiale et de l'innovation n'est pas encore achevé.

L'échange entre acteurs publics et privés, qui permet d'aborder les sujets sous différentes facettes et de bénéficier d'un réservoir de compétences, de bonnes pratiques et d'expériences, se fait par l'organisation de journées thématiques ou transverses, autour de thèmes comme la documentation, la veille informative et le transfert de technologie. Tous les ans, nous organisons également une Fête de la Science, qui se déroulera cette année du 20 au 22 novembre.

Le sujet des véhicules hybrides avait déjà été abordé en 2006. Sur la suggestion d'Alain Bravo, directeur de Supélec, nous souhaitons aujourd'hui faire le point sur cette problématique. Il est à noter, par exemple, que cinq des sept axes stratégiques d'un pôle de compétitivité tel que Mov'eo, créé en 2006 et devenu pôle mondial depuis, concernent la question de l'hybridation. Il y a aujourd'hui urgence à trouver des solutions alternatives, dans la mesure où les transports représentent 31% de la consommation énergétique mondiale et 50% de la consommation de produits pétroliers. Les politiques publiques françaises et européennes nous y incitent d'ailleurs fortement, au travers du Strategic Energy Plan, de la stratégie nationale de recherche et d'innovation ou des priorités définies pour le Grand Emprunt.

Nous attendons donc beaucoup de ces débats. S'il s'en dégage des recommandations fortes, Ile de Science s'engage à les porter en votre nom au plus haut niveau. Je tiens à remercier Monsieur Jean-Claude Vannier pour l'organisation de cette journée, ainsi que les intervenants industriels en leur rappelant à quel point il est important pour nous, scientifiques, de recueillir votre avis sur ces questions.

Alain BRAVO
Directeur Général de Supélec

C'est aujourd'hui la deuxième fois que Supélec accueille une conférence sur l'énergie dans les transports. Nous avons, en effet, estimé qu'il était important de faire un point trois ans après la première, d'autant plus que Supélec accorde une grande importance aux questions d'énergie. L'école offre non seulement deux options traditionnelles sur ce sujet mais vient d'en créer une troisième cette année, qui est commune avec Centrale Paris et l'ensemble de ces options regroupe au total une centaine d'élèves. Nous développons également des masters de « Sciences et Perspectives en Energie Electrique » et de « Nuclear Energy ». Avec nos collègues de Cachan, nous avons déposé un dossier sur la thématique « Electrification et Propulsion Automobile ». Nous participons, par ailleurs, à un certain nombre de pôles de compétitivité portant sur ce thème, tels que Mov'eo, System@tic et Astech. Enfin, la création d'un pôle Climat-Environnement-Energie se dessine actuellement.

Toutes ces raisons font que les débats organisés aujourd'hui nous sont particulièrement précieux. Je vous remercie de votre présence et vous souhaite un bon travail.

Quelques enjeux du véhicule électrique

Gonzalo HENNEQUET

**Direction des Technologies Avancées de l'Automobile
Renault**

Renault poursuit actuellement une politique de développement massif du véhicule électrique, après avoir mené une série de travaux préalables.

L'étude du rapport entre richesse et motorisation fait apparaître trois types de marchés. Les marchés arrivés à maturité sont constitués d'une population relativement aisée, d'une industrie bien établie et d'un important niveau de motorisation. Dans les marchés croissants, la richesse commence à s'accumuler, l'industrie locale se développe et le niveau de motorisation augmente très rapidement. Enfin, dans les marchés émergents, le PNB par tête perce le plancher de 5 000 dollars, l'industrie locale émerge et le niveau de motorisation est en passe de croître très rapidement.

La courbe de tendance montre une corrélation positive entre le PNB et le nombre de véhicules pour 1 000 habitants. Des pays comme Singapour et Hong-Kong, combinant un revenu élevé et un faible niveau de motorisation, constituent des particularités, qui s'expliquent sans doute par des contraintes géographiques spécifiques. Ces cas particuliers sont intéressants, car ils nous obligent à imaginer des schémas de motorisation et de mobilité différents. Or cette démarche risque de nous concerner à notre tour si nous voulons atteindre les niveaux d'émission de CO₂ fixés par la France et l'Europe.

Une étude du Laboratoire d'Economie des Transports analyse les mesures à prendre pour atteindre le niveau d'émission Facteur 4 en France, c'est-à-dire un niveau quatre fois inférieur en 2050 à ce qu'il était en 1990. L'étude part des études technologiques et établit le niveau d'émission de CO₂ en fonction des contraintes que constituent les politiques publiques, le contexte démographique et économique, l'organisation de la production et de la distribution, les modes de vie et les variables clés du transport. Trois scénarios ressortent de cette étude. Le scénario « Pégase » envisage une réorganisation du système de transport et un basculement vers l'hydrogène. Il prévoit un développement du modèle de mobilité équivalent à celui des cinq dernières décennies, soit une hausse de 42% de la mobilité entre 2000 et 2050. Dans ces conditions, l'objectif Facteur 4 ne pourrait être atteint que par le recours massif aux piles à combustible et à un hydrogène produit sans émission de CO₂. Les scénarios « Hestia » et « Chronos » tiennent, eux, compte de restrictions en termes d'évolution de la mobilité, qu'elles se fassent par le changement des habitudes des consommateurs ou par la contrainte réglementaire. Aujourd'hui, vous le savez, les technologies PAC ne sont pas encore commercialisables. C'est pourquoi Renault a choisi de se placer dans le cadre des deux derniers scénarios et opté pour le véhicule électrique pur. La stratégie doit néanmoins être diversifiée. Notre feuille de route prévoit ainsi une évolution partant des technologies GMP conventionnelles (essence et diesel) de plus en plus optimisées afin de réduire les émissions de CO₂ et de respecter les normes de pollution. A partir 2012, elle prévoit l'introduction massive de véhicules électrique à batterie, puis de Plug-In Hybrids, de véhicules électriques à prolongateur d'autonomie embarqué et enfin, à l'horizon 2020, de véhicules électriques à Fuel Cell.

Nous avons comparé les émissions de CO₂ du puits à la roue pour trois types de véhicules. Elles s'établissent respectivement à 184 et 136 g.CO₂/km pour la Megane 3 essence 1.6 16v et pour la Megane 3 diesel 1.5 dCi. Pour notre véhicule électrique Fluence, présentée au dernier Salon de Francfort, ces émissions dépendent de la production électrique envisagée. En effet, si ce véhicule n'émet pas de CO₂ du réservoir à la roue, les émissions occasionnées par la production d'électricité du puits au réservoir sont à prendre en compte. Si l'on considère le mix électrique de l'Union Européenne, les émissions de la Fluence s'établissent à 62 g.CO₂/km. Elles chutent à 12 g.CO₂/km dans le cas du mix français, en raison de sa plus grande composante nucléaire. Elles s'élèvent 128 g.CO₂/km si l'on considère une production en provenance de centrales électriques à charbon. Enfin, les émissions sont nulles dans le cas d'une énergie électrique 100% renouvelable.

Il faut cependant considérer le cycle de vie complet du véhicule. Pour ce faire, nous utilisons donc l'approche « Analyse du Cycle de Vie », qui tient compte des effets sur l'environnement associés aussi bien à la production de carburant qu'à la production, à l'utilisation et au recyclage du véhicule. Les effets sont analysés sur la pluviométrie, l'acidification des terres, l'eutrophisation, le réchauffement climatique et la couche d'ozone. Nous constatons alors que les conséquences de la production du véhicule sont loin d'être négligeables, notamment sur la couche d'ozone.

Le cycle pétrolier que nous connaissons actuellement se caractérise par des réserves énergétiques qui s'épuisent et des modes de production et d'utilisation polluants. Si nous envisageons, à l'inverse, le passage au cycle solaire, les émissions de CO₂ seraient nulles. La solution d'avenir se trouvera probablement entre ces deux extrêmes.

Le développement du véhicule électrique n'est pas si aisé. Tout constructeur automobile cherche avant tout sa rentabilité. Au Congrès FISITA 2008, Volkswagen a ainsi présenté un schéma reliant le prix de vente d'un véhicule à sa consommation en carburant. Si on le compare aux véhicules phare ou aux véhicules classiques, on constate que le véhicule électrique est celui qui consomme le moins mais qui coûte le plus cher. Aujourd'hui, lorsque nous vendons un véhicule conventionnel, nous ne nous engageons pas auprès du client à lui fournir son carburant *ad vitam aeternam*. Dans le cas du véhicule électrique, nous comptons ainsi changer de *business model*, c'est-à-dire lui proposer un prix de vente équivalent à ceux des véhicules conventionnels auquel viendra s'ajouter un forfait pour la location de la batterie d'un montant bien inférieur au coût du carburant. Cette idée s'inspire de notre projet *Better Place* en Israël et s'avère la seule solution pour franchir le pas. Lorsqu'on s'apprête à introduire une telle technologie de rupture, il faut donc toujours penser au *business model* associé.

Selon le véhicule envisagé, il existe différents rapports entre puissance et énergie. Une batterie au lithium-ion, par exemple, possède une double tête « puissance » et « haute énergie », ce qui permet de remplacer le réservoir pour alimenter le GMP. Dans un système Start&Stop classique, la puissance se situe entre 3 000 et 4 000 W. Elle s'élève à 10 kW dans le cas du *Mild Hybrid*. Un *Full Hybrid* de type conventionnel, comme la Toyota Prius, possède une grande capacité de boost, un système de freinage récupératif mais une faible capacité de roulage électrique car la batterie a très peu d'énergie. Dans un *Plug-In Hybrid*, la capacité énergétique de la batterie est renforcée pour accroître la capacité de roulage électrique pur. Elle se situe aux alentours de 10 kWh pour une autonomie de 80 kilomètres. Dans les systèmes de type *Pure EV*, l'énergie et la puissance sont nettement supérieures. Nous nous situons, dans nos applications actuelles, entre 24 kWh en début de vie et 21 kWh en fin de vie. Comme vous le savez, la batterie atteint un niveau de capacité stable au bout d'un certain temps. Nous nous basons sur celui-ci pour calculer le niveau d'autonomie afin que le client ne soit pas piégé.

L'impact sur le réseau électrique doit également être pris en compte. Dans un système Start&Stop, 14V suffisent tandis que 42V sont nécessaires pour le Mild Hybrid. En revanche, pour les modèles Full Hybrid et Plug-In Hybrid, il est nécessaire de monter en tension. Nos modèles de véhicule électrique actuels ont une tension maximum de 400V.

Concernant les chimies des batteries, la technologie la plus utilisée actuellement est celle du lithium-ion. Le facteur important à prendre en compte est celui de la densité d'énergie, exprimée en watt-heure par kilogramme, au niveau de la cellule. Les batteries au plomb ou au nickel-cadmium sont toujours disponibles, mais produisent des niveaux d'énergie très faibles. La batterie nickel-métal-hydrure du Toyota Prius est plus satisfaisante mais sa densité d'énergie reste inférieure à 100 Wh/kg. Aujourd'hui, les deux technologies concurrentes sont celle du lithium-métal de Bolloré et celle du lithium-ion, que nous développons à un niveau de densité supérieur à 200 Wh/kg.

En termes de rupture technologique, de nombreux éléments restent à développer. Sur certains domaines, comme celui des batteries, nous accusons un certain retard. Au niveau du GMP électrique, nous devons travailler sur l'amélioration des conceptions de moteurs et de l'intégration mécatronique. Au niveau des batteries, les progrès à réaliser concernent l'énergie et la puissance spécifiques, la sécurité, la recyclabilité et la fiabilité. Un troisième axe de travail touche à la gestion de l'énergie. Il ne faut pas oublier que, dans un véhicule électrique, la batterie est la seule source d'énergie. Elle doit donc notamment faire fonctionner les auxiliaires tels que le chauffage ou la climatisation, qui sont très voraces en énergie et diminuent d'autant l'autonomie du véhicule. Nous travaillons actuellement sur ce paramètre, en développant des systèmes de récupération d'énergie tel que le freinage découplé. Un dernier axe de travail concerne la connectivité à l'infrastructure et la disponibilité de l'énergie.

Le développement du véhicule électrique doit également prendre en compte les cycles de conduite, qui représentent la façon dont le client utilise le véhicule : en milieu urbain, routier, autoroutier ou embouteillé. Pour le projet Fluence, nous avons modélisé tous les cycles de roulage en Israël, en tenant compte de l'évolution de la pente et de la congestion du trafic, et tenté de réaliser les parcours avec l'autonomie nécessaire. Nous avons créé pour l'Europe un ensemble de cycles particuliers.

Une modélisation du vieillissement des batteries a également été menée par nos services. Par analogie entre le modèle de fatigue mécanique et l'endommagement structurel des électrodes d'une batterie au lithium-ion, cette étude permet de prévoir la durée de vie en fonction du cyclage de la batterie.

Pour finir, je souhaiterais attirer votre attention sur le fait qu'aujourd'hui, la plupart des activités de développement des batteries et des technologies associées sont concentrées en Asie-Pacifique. Aux Etats-Unis, il n'existe que deux fabricants de batteries : EnerDel et A123 Systems. En Europe, enfin, Saft et GAIA sont les deux seules sociétés existantes.

La question d'avenir est celle des sources et de la production d'énergie à terme. Il n'existe pas de schéma unique. La solution passe au contraire par une combinaison la plus rationnelle possible des sources d'énergie conventionnelles et renouvelables.

Questions/Réponses relatives à l'intervention de M. Hennequet

De la salle

Comment Renault organise-t-il la séparation des tâches dans sa collaboration avec Nissan ? D'autre part, avez-vous développé des partenariats avec les grands laboratoires de recherche ?

Gonzalo HENNEQUET

Entre 2004 et fin 2005, J'ai été personnellement en charge du pilotage du Research and Advanced Engineering Coordination Team au sein du Cross-Company Team pour la partie « powertrain ». Au premier abord, la collaboration n'a pas été facile. Il s'agit de deux mondes, de deux cultures différentes. Il faut faire preuve d'une grande ouverture d'esprit et rester convaincu que ces deux entreprises ne pouvaient pas se permettre de faire les choses séparément. Nous avons ainsi développé des gammes de véhicules complémentaires, en gardant chacun notre image de marque. Néanmoins, beaucoup de composants et groupes motopropulseurs sont communs. Aussi, on a une Direction des Achats Renault-Nissan, ce qui représente des avantages différents, des gammes de moteurs complémentaires et partagées, de même que les boîtes de vitesses,... Les batteries au lithium-ion sont, par exemple, développées par AESC, qui est une joint-venture entre Nissan et NEC. Concernant le volet « moteur électrique », nous nous sommes répartis les tâches. Renault prend en charge la partie « moyenne et basse puissance », jusqu'à 70 kW, tandis que Nissan développe la gamme supérieure, à partir de 90 kW. Pour moi, cette Alliance est une grande réussite et est aussi source de fierté pour nous tous.

S'agissant des laboratoires de recherche, nous sommes associés à ParisTech et à de nombreux pôles universitaires, ainsi qu'au LRCS de l'Université d'Amiens. Au niveau européen, nous pilotons le Projet Hélios, qui étudie les nouvelles générations de batterie au lithium-ion.

De la salle

Les questions de sécurité et de fiabilité des batteries sont-elles aujourd'hui sous contrôle, étant donné que Renault prévoit la commercialisation des véhicules électriques à l'horizon 2011 ?

Gonzalo HENNEQUET

C'est en effet le cas pour les technologies au lithium-ion développées par AESC qui équiperont nos premiers véhicules « Fluence VE » « Kangoo VE » et « Zoé ». La sécurité et la fiabilité sont un acquis préalable au passage des différents jalons projet. Chez d'autres Constructeurs, des progrès restent à faire, s'agissant notamment du taux de Cobalt contenu dans la formulation des anodes, mais ces constructeurs trouveront sans problème la solution s'ils ne l'ont pas déjà trouvée.

De la salle

Au Salon de Francfort Renault a mentionné une puissance de 100 kW pour le véhicule tout-électrique, soit l'équivalent de 140 CV, ce qui paraît important. Les véhicules auront-ils réellement une motorisation de ce type ?

Gonzalo HENNEQUET

S'agissant du véhicule que nous avons présenté au Salon de Francfort on a dû annoncer des puissances maximales de 100 CV et non pas de 140 CV. En effet, le pic de puissance du GMP phare s'établit à 70 kW et la puissance maximum continue à 50 kW environ. Le chiffre de 100 kW est donc plutôt un ordre de grandeur pour indiquer la gamme « Alliance Renault Nissan », car. chez Nissan, le moteur électrique le plus puissant avoisine les 90 kW.

Les motorisations hybrides. **Etat des lieux, enjeux et perspectives.**

Franck BRIAULT
PSA

I. Les différents types d'hybridation

Les technologies d'hybridation ne sont pas nouvelles. Elles sont connues depuis quelques décennies. Le contexte actuel a joué un rôle d'accélérateur et provoqué l'industrialisation et la mise en production de certaines de ces technologies.

Il existe différents types d'hybridation d'un moteur thermique, que l'on peut décliner par niveau de puissance et de fonctionnalité. Aux alentours de 2 kW, nous trouvons les systèmes du type Micro-Hybrid, qui permettent la mise en veille du moteur à l'arrêt du véhicule. Le Mild-Hybrid se positionne aux alentours de 8 kW et permet, en plus des fonctions du Stop&Start, une récupération d'énergie en décélération et une aide au moteur, du type overboost à l'accélération, permettant d'accroître le confort du conducteur. A partir de 20 à 25 kW, nous rencontrons des fonctionnalités du type Full-Hybrid qui permettent, outre les précédentes, le roulage électrique pur, l'optimisation du moteur thermique et un accroissement des capacités de récupération d'énergie au freinage.

La stratégie engagée par PSA depuis quelques mois est axée sur la démultiplication rapide et large de systèmes Stop&Start, qui sont déjà industrialisés avec la Citroën C3 depuis 2004. Ces modèles permettent de couper le moteur à l'arrêt et de le redémarrer automatiquement. Ils sont relativement peu intrusifs en termes de re-conception du moteur thermique. Ils se basent, en effet, sur la possibilité d'avoir un alternateur réversible, lui-même alimenté par un boîtier électronique et permettant la fonction de redémarrage. Etant données les sollicitations supérieures du système, la batterie a certaines spécificités. Le dispositif est complété par la présence de quelques capteurs, qui permettent de détecter les situations de redémarrage.

Nous pensons que le système Stop&Start permet, à moindre coût, d'atteindre des niveaux intéressants de réduction de consommation. Mais ses bénéfices ne s'arrêtent pas là. Il apporte en outre un surcroît de confort par l'absence de bruit et de vibration à l'arrêt. Enfin, le système Stop&Start spécifique avec alternateur permet un redémarrage rapide et quasi-imperceptible. Ses performances en termes de réduction de consommation sont contrastées selon les cycles de conduite : -15% sur un cycle embouteillé et -6% sur un cycle mixte. Il offre la possibilité d'un premier accès à l'hybridation et représente un faible coût et une faible complexité pour des gains de confort et de consommation intéressants.

II. Les quatre points clés de la stratégie PSA

Le développement des véhicules de type Full-Hybrid constitue le second axe de notre stratégie. Nous avons orienté ce déploiement autour de quatre points clés. Nous envisageons, tout d'abord, une hybridation sur la base d'un moteur diesel, alors qu'elle était exclusivement développée jusque là sur des motorisations essence. Nous avons, d'autre part, adopté le principe de l'hybridation

parallèle. Nous comptons en outre utiliser des composants connus et déjà largement industrialisés, de façon à maximiser les synergies et limiter les surcoûts. L'objectif est, enfin, de mettre en place une architecture innovante.

Le choix de l'hybridation à partir d'un moteur diesel présente plusieurs avantages. Comparé à un hybride essence, le moteur HDI implique des consommations de même niveau tandis que les coûts de stockage énergétique, de machine à traction et d'électronique engendrés par les systèmes hybrides sont bien supérieurs à ceux du diesel. Sur un marché européen fortement diesélisé, l'introduction d'une technologie d'hybridation essence ne présente donc pas un grand intérêt. L'hybride diesel permet, en outre, une véritable rupture en termes de consommation et d'émission de CO₂. Cette stratégie paraît donc cohérente sur le marché européen. Elle l'est moins, en revanche, sur les marchés américain ou japonais, où le taux de diesélisation est nettement moins élevé.

Il existe différents types d'hybridation. Le principe de l'hybridation série consiste à embarquer à bord du véhicule un système de type groupe électrogène. Une source d'énergie thermique ou, à terme, une pile à combustible permet de recharger la batterie. La traction du véhicule est réalisée par la machine électrique seule. Nous n'avons pas retenu ce type d'hybridation, principalement pour des raisons de dimensionnement du système électrique de traction, qui doit être adapté à l'ensemble des profils d'utilisation du véhicule. Le principe d'hybridation à dérivation de puissance, utilisé notamment par Toyota et mettant en œuvre un système de transmission complexe, n'a lui non plus pas été retenu, en raison de son coût, de son dimensionnement et de sa complexité. Nous avons donc fait le choix d'un système d'hybridation parallèle, qui repose sur l'idée de réaliser le nœud au niveau mécanique. L'entraînement des roues via le système de couplage se fait soit par le moteur thermique soit par le moteur électrique. Il permet une latitude intéressante en termes de fonctionnalité et un dimensionnement mesuré du système de traction tout en assurant une dynamique suffisante. Le choix de l'hybride parallèle nous est apparu comme un bon compromis entre, d'une part, gains et bénéfices pour le client et, d'autre part, coût et complexité du système.

Il reste, enfin, à trouver l'architecture la plus intéressante pour le client. Nous avons retenu un principe d'architecture modulaire, qui consiste à maintenir un GMP thermique à l'avant comme dans les véhicules conventionnels. Le système d'hybridation machine/onduleur/batterie est, quant à lui, positionné à l'arrière du véhicule et provoque la propulsion arrière. Cette architecture présente de nombreux avantages en termes de modularité et de prestations.

III. Les systèmes d'hybridation rechargeable

Pour dire quelques mots de l'hybride rechargeable, il permet de réaliser des gains d'émission de CO₂ supplémentaires, en allant puiser l'énergie sur le réseau électrique et non sur le carburant. Il permet également de bénéficier des incitations fiscales liées à ce type de système et de mettre en avant l'image écologique d'une extension du roulage électrique.

Selon sa forme, le Full-Hybrid représente donc des gains de consommation de carburant de l'ordre de 25%. Ils s'élèvent à 50% dans le cas d'un Plug-In à dominante thermique et à 75% pour un Plug-In à dominante électrique. Ils atteignent, enfin, 100% pour un véhicule électrique pur. Le Plug-In permet donc de décliner des intermédiaires entre le Full-Hybrid et le véhicule tout-électrique.

IV. Les véhicules électriques

L'expérience de PSA dans le domaine des véhicules électriques est ancienne. Nous avons ainsi vendu plus de 10 000 véhicules de ce type et 3 500 contrats de location sont encore en cours. Nous avons aujourd'hui un partenariat avec Venturi, qui électrifie pour notre compte les véhicules de type Berlingo dans le cadre, par exemple, d'un appel d'offres de La Poste. Nous avons également développé un partenariat avec MMC afin de déployer en Europe un véhicule électrique pur, qui est une déclinaison du modèle MiEV de Mitsubishi déjà commercialisé au Japon. Ce véhicule offre des prestations intéressantes aussi bien en termes d'accélération que d'autonomie qui le rendent compatibles avec certains marchés, notamment urbains. Notre stratégie dans le domaine du véhicule électrique consiste donc à établir des partenariats, car nous pensons que le marché reste pour l'instant limité.

Questions/Réponses relatives à l'intervention de M. Briault

De la salle

Comment PSA a-t-il pris en compte, dans sa stratégie, la question de l'after-market ? Quelle organisation avez-vous prévu en termes de réparations, de maintenance et d'accompagnement ?

Franck BRIAULT

Cette question occupe une place très importante depuis le début du projet. Elle s'est déclinée, tout d'abord, en termes d'accompagnement des usines, pour lesquelles ces technologies sont nouvelles et impliquent des contraintes de sécurité et d'habilitation spécifiques. D'autre part, l'après-vente a également été envisagée dès le départ. Nous avons, dans ce domaine, bénéficié de l'expérience de Toyota, qui a étudié ce problème en profondeur lors du passage du premier au second modèle de Prius. En définitive, l'association au projet des usines et de l'après-vente s'est faite très tôt, à la fois dans une démarche de formation et de conception.

De la salle

Les deux premières interventions nous ont permis de prendre connaissance des deux philosophies différentes de Renault et Peugeot dans ce domaine. La présentation de la stratégie de Renault m'a un peu inquiété, sachant que les performances des batteries aujourd'hui ne permettent qu'une très faible autonomie. J'aurais aimé également qu'on ne parle pas d'une émission de CO₂ nulle mais qu'on prenne en compte celle que provoque la production d'énergie, même éolienne. Je constate que PSA témoigne d'une certaine prudence en évoquant les véhicules hybrides. Il faut savoir que, pour alimenter un parc de vingt millions de véhicules électriques, il convient de construire vingt centrales nucléaires supplémentaires. La technologie hybride présente l'avantage d'une récupération de l'énergie de freinage.

Vous avez parlé d'un gain de consommation de l'ordre de 30% pour un véhicule hybride d'une puissance de 20 à 30 kW. La limitation à ce niveau résulte-t-elle d'une volonté de restreindre la batterie raisonnablement embarquée ? De la même manière, pouvez-vous nous en dire plus sur les critères qui vous ont amené à rejeter le choix de l'hybride série ?

M. PRINCE, PSA - Département Innovation

L'efficacité entre 20 et 30 kW vient de l'usage qui est fait du véhicule. En usage courant, le véhicule est rarement sollicité à un niveau de 30 kW. Il serait possible d'optimiser au-delà mais, comme il s'agit d'un usage très peu fréquent, le gain n'apparaît pas.

S'agissant de l'hybride série, la chaîne de rendement globale n'est pas bonne. Des progrès sont possibles, mais nous obligerait à perfectionner surtout la partie thermique. Or le développement du moteur thermique est extrêmement coûteux. D'autre part, cette technologie implique une grande quantité de batterie embarquée, ce qui accroît considérablement le prix du véhicule. Assumer ainsi un fort coût de développement pour des véhicules dont on ne connaît pas bien l'acceptabilité du marché est un risque que nous n'avons pas voulu prendre.

De la salle

Quel est l'avenir de la pile à combustible dans les véhicules électriques ? Développez-vous des recherches et des partenariats à ce sujet ?

M. PRINCE, PSA - Département Innovation

La pile à combustible présente un inconvénient majeur : celui de la production d'hydrogène. Cette production est, aujourd'hui, majoritairement issue du pétrole et donc très émettrice de CO₂. D'autre part, le stockage de l'hydrogène pose problème et s'avère très intrusif sur la structure des véhicules. Nous avons néanmoins des pistes pour optimiser le coût d'ensemble et rendre cette technologie, à performance équivalente, aussi compétitive qu'une batterie. La pile à combustible est donc une option que nous étudions mais les problèmes de production et de distribution demeurent. Les coûts d'investissement engendrés sont, là encore, importants pour un marché de taille limitée. Nous devons prendre en compte tous ces aspects avant d'envisager une production en série.

Françoise BARBIER, Air Liquide

Je voulais simplement réagir sur les commentaires à propos de la production d'hydrogène. Les études internationales ont montré que, même produit à partir du gaz naturel, l'hydrogène permet une réduction de 50% des émissions de CO₂ par rapport aux moteurs conventionnels.

Les systèmes hybrides **Systèmes moteurs et électriques**

Paul ARMIROLI
Valeo-VEES

La stratégie de Valeo repose sur le développement de l'hybridation dans le but de réduire les émissions de CO₂. En 2004, nous avons introduit sur le marché un système Stop&Start de première génération, en partenariat avec PSA. L'objectif était de réduire de 6% la consommation. La concurrence s'est rapidement développée sur le marché et a proposé des solutions à base de démarreurs. Depuis septembre 2009, nous avons également évolué vers des systèmes de ce type, qu'ils soient à aimant permanent ou à pôle bobiné. Dans notre roadmap, nous avons prévu d'ajouter des fonctions. La prochaine génération, dont la production démarrera en 2011 et que nous appelons StARS+X, prévoit un freinage récupératif. A partir de 2013 se développeront les systèmes du type Mild-Hybrid.

La roadmap se décline donc en termes de fonctionnalités, mais également en fonction du temps. Valeo a, en effet, développé des solutions sur la base de ses métiers traditionnels (alternateur et démarreur) avant de monter en gamme, sachant que cela implique d'intenses activités de R&D pour un équipementier. Présentées en termes de coûts, les solutions Stop&Start de nouvelle génération représentent un surcoût de 100 à 200 euros. Ce surcoût s'élève à 800 euros pour des systèmes à freinage récupératif, à 1 000 euros pour le Mild-Hybrid et à plus de 5 000 euros pour les véhicules électriques. Il convient donc de comparer ces surcoûts aux gains de consommation associés afin de prioriser les développements.

Nous avons essayé de prévoir l'évolution du marché dans certaines hypothèses de coût du carburant et de prix des batteries. Les systèmes micro-hybrides, du type Stop&Start à base alternateur ou démarreur entraînés par courroie, devraient connaître une évolution favorable. Les solutions Mild-Hybrid, c'est-à-dire autour de 15kW, devraient, selon nos prévisions, décoller en 2011 avant de croître de 5% en 2015 et de représenter 14% du marché en 2020. Sur le marché européen, l'utilisation du Stop&Start devrait se généraliser sur l'ensemble de la période avec, selon nous, une prépondérance du Mild-Hybrid par rapport au Full-Hybrid. Cette évolution s'explique par les caractéristiques de ces pays mais aussi par l'évolution de la réglementation. En 2012, en effet, la norme s'établira à 120g/km pour l'ensemble de la flotte des véhicules constructeurs et sera abaissée à 95g/km en 2020. Des pénalités tant pour les constructeurs que pour les clients qui ne respecteront pas ces normes sont prévues. Aux Etats-Unis, en revanche, les incitations favorisent plutôt les projets Full-Hybrid et très peu les systèmes Stop&Start. Cette tendance s'explique par la prépondérance des véhicules à boîte automatique et à moteur puissant. Les marchés européen et américain s'avèrent donc différents. Pour nous, la problématique reste néanmoins la même et nous conduit à envisager le développement de produits standard.

La nouvelle réglementation européenne fixe une norme de 120g/km pour 2012, qui sera fonction du poids moyen des flottes de véhicules. Elle impose que 65% de la flotte respecte la norme en 2012, 75% en 2013, 80% en 2014 et 100% en 2015. La norme évoluera, par la suite, à 95g/km en 2020. La législation prévoit une pénalité pour chaque gramme de dépassement de cette norme. Le premier gramme en excès sera taxé de 5 €, le second gramme de 20 €, le troisième gramme de 45 € et

chaque gramme supplémentaire de 95 € au-delà. La contrainte pour les constructeurs et les équipementiers est donc forte.

S'agissant de notre système StARS, la seconde génération consiste à réintégrer l'électronique de commande à l'arrière de la machine. Nous sommes partis d'un alternateur conventionnel à griffes auquel nous avons ajouté des aimants interpolaires, qui ont un effet on négligeable sur le couple. Nous avons également remplacé le pont de diodes d'un alternateur conventionnel afin d'obtenir un fonctionnement bi-modal de démarrage du moteur. Ce système implique deux développements importants : l'ajout d'un Asic de contrôle et d'un power module. L'i-StARS Plus est une machine sept phases fonctionnant en 12V qui s'applique bien aux architectures standard actuelles. Une contrainte importante surgissant de l'introduction des hybridations concerne le réseau de bord. Dans un système Stop&Start, il faut éviter que le redémarrage sollicite la batterie de manière trop importante au détriment des autres fonctionnalités, notamment de sécurité. Nous avons ainsi introduit un convertisseur DC/DC de 200W et plus afin de protéger la stabilité du réseau de bord au redémarrage. Nous avons également développé des capteurs qui surveillent l'état de charge de la batterie.

Un autre axe de recherche concerne les problématiques de récupération d'énergie et d'évolution des moteurs thermiques. Une solution qui se développe aujourd'hui est d'utiliser des moteurs de plus petite cylindrée. On parle alors de downsizing. Ce type d'évolution permet d'utiliser un moteur 1,5l en ayant le même type de roulage dans sa zone de meilleur rendement. On crée une zone de perte de couple, que le Mild-Hybrid va venir compenser.

En collaboration avec l'INRETS, nous avons étudié, pour différents types de cycles, les gains de consommation réalisés en fonction de la puissance de la machine électrique associée à un moteur thermique. L'optimisation du gain de consommation se fait aux alentours de 10 à 15kW tandis que le point d'inflexion se situe à 5kW. C'est la raison pour laquelle nous avons développé le projet StARS+X. L'objectif était d'imaginer une solution la moins onéreuse possible permettant d'atteindre un niveau de bénéfices de l'ordre de 80%, ce que nous avons réalisé avec une machine d'environ 5kW. L'architecture du système StARS+X permet de passer de 6 à 10% de gains de consommation. La différence s'explique par une récupération d'énergie réalisée grâce à un pack ultra-capacité.

Nous prévoyons l'introduction de moteurs downsizés à l'horizon 2013. Nous envisageons plusieurs options, allant de l'optimisation du 14+X au Mild-Hybrid en passant par l'association du 14+X avec un e-charger. L'objectif est d'atteindre un gain de l'ordre de 20%, en misant à la fois sur une machine plus puissante permettant d'accroître les possibilités de récupération et sur un moteur downsizé. L'architecture du système 14+X s'avère assez standard par rapport aux autres hybrides. L'appellation « +X » vient du fait que nous avons créé un réseau de tension allant de 14 à 27V. Ce réseau est séparé du réseau standard du véhicule, qui fonctionne lui en 12V. Un convertisseur DC/DC de 2kW est placé entre les deux réseaux. La machine électrique reste, quant à elle, inchangée. Cette architecture présente l'avantage de résoudre le problème de contrainte sur le réseau 12V. Le moteur, en effet, démarre grâce à la puissance emmagasinée dans les ultra-capacités. Nous avons réalisé un grand nombre d'essais, sur la base d'un moteur 1,6l essence. Les gains de consommation sur un cycle NEDC s'établissent à 8,6% et s'élèvent à 10,9% sur un cycle Artemis, plus emblématique du roulage réel.

Nous avons également constaté l'existence d'un effet symétrique permettant, au cours de la décélération, de récupérer de l'énergie immédiatement restituable dans la phase d'accélération qui

suit. Nous travaillons actuellement à combler le creux de couple par un système électrique appelé « e-charger », qui consiste à créer une surpression amenant davantage d'air au démarrage pendant la phase où le turbo n'est pas encore efficace. Les premiers essais font état d'une réactivité du e-charger inférieure à 300 millisecondes. L'autre solution consisterait à changer la structure de la machine électrique afin d'augmenter son rendement en mode moteur. On passerait alors d'une structure de type machine à griffes à une solution dérivée de moteurs de traction de type industriel, telle qu'une machine à aimant permanent à cinq pôles.

Valeo a également mis en place une équipe chargée de travailler sur les véhicules électriques. Dix mille véhicules ont été réalisés dans le passé, pour lesquels nous avons pris en charge la partie électronique. Les travaux en cours aujourd'hui concernent une deuxième génération de véhicules et portent sur les véhicules électriques purs, les Plug-In et les chargeurs. L'évolution du marché des véhicules électriques est conditionnée, selon nous, par deux éléments : le coût de la partie powertrain et le coût des batteries. Trois axes sont envisageables pour maîtriser cet aspect. Le premier consiste à réduire le coût du véhicule en réduisant le coût de la partie transmission. Le second s'attache à réduire la consommation d'énergie liée à l'utilisation du véhicule, notamment pour le refroidissement du moteur, le chauffage ou l'éclairage. Le troisième axe concerne la partie batterie.

Pour chacun de ces trois axes, nous avons identifié les évolutions que nous prendrons en charge en interne, celles qui seraient confiées à des partenaires et celles qui ne relèvent pas de notre activité d'équipementier. Les développements pour la partie « powertrain » concernent le moteur, le convertisseur DC/DC et les chargeurs de batterie. L'aspect « stockage d'énergie » s'étend des ultra-capacités jusqu'au pack batterie refroidi. La partie « supervision » comprend aussi bien le hardware que le software.

Il existe différents types de batteries. Nous utilisons aujourd'hui des batteries conventionnelles à plomb. Les batteries AGM sont préconisées pour les applications Stop&Start. Il s'agit d'évolutions des batteries plomb qui acceptent mieux les cyclages et allongent par conséquent la durée de vie. D'autres technologies existent, telles que les batteries nickel-métal-hydrure, les batteries lithium et les ultra-capacités. Nous avons réalisé une étude comparative des contraintes liées aux différents types de batterie et à leur profil d'utilisation. Nous avons ainsi pris en compte l'aspect « énergie spécifique », qui varie en fonction des technologies, l'aspect cyclabilité, qui dépend de la durée de vie que les constructeurs veulent assigner à leur batterie, le rendement énergétique entre la charge et la décharge, le coût et le recyclage. L'aspect sécuritaire reste néanmoins, pour nous, le plus important.

Questions/Réponses relatives à l'intervention de M. Armioli

De la salle

L'un des exposés précédents nous a montrés qu'une batterie lithium pouvait être rechargée en 30 minutes. Quel est l'impact des véhicules électriques sur la recharge ? Les usagers pourront-ils recharger leur véhicule chez eux ou devront-ils impérativement utiliser des bornes ?

Paul ARMIROLI

On nous adresse actuellement des demandes de chargeurs rapides. Deux types de raisonnement peuvent être envisagés. Une solution consisterait à prévoir un chargeur à l'intérieur du véhicule, mais cela implique d'embarquer un poids qui n'est pas fonctionnel.

M. PRINCE, PSA - Département Innovation

Je ne sais pas si la question était posée en termes d'impacts sur le réseau ou en termes législatifs. Un groupe de travail rassemblant équipementiers, constructeurs et énergéticiens a récemment remis un rapport au gouvernement. Ses conclusions relatives à ce qui est permis et ce qui est recommandé dans la rue et à la maison concernant la recharge sont disponibles sur internet.

Hybridation des véhicules industriels

Abderrahmane HAMMAR

PVI

Nous définissons un hybride comme un véhicule combinant deux ou plusieurs sources de puissance pouvant fournir de manière directe ou indirecte la puissance nécessaire à sa propulsion. Un hybride classique relie une source thermique, à une source électrique (pack de batteries et/ou supercondensateurs). Un hybride tout électrique utilise la batterie comme source d'énergie et le supercondensateur comme source de puissance. Comme dans le cas du système WATT, ce dernier est un autobus urbain qui assure une autonomie entre deux stations consécutives et une recharge rapide à chaque arrêt.

PVI est une PME qui fabrique des véhicules propres, à gaz naturel, électriques et hybrides lourds, représentant une niche de marché n'intéressant pas les grands industriels, telles que les bennes à ordures, les bus électriques de capacité moyenne ou les véhicules ferroviaires de maintenance. Dans les années 1990, PVI par exemple a développé des modèles de bennes à ordures fonctionnant d'une manière bi-modale, c'est-à-dire assurant un roulage en thermique à l'extérieur de la ville et une collecte en tout-électrique. Avec une centaine de véhicules vendus, ce modèle a rencontré un succès commercial.

Ces dernières années, nous avons démarré l'hybridation tout-électrique, qui comprend une motorisation tout-électrique, un système de stockage d'énergie basé sur des composants de puissance et des composants d'énergie et une électronique de puissance adaptée. Il existe deux types de composants de stockage d'énergie électrique. Premier type est basé sur des électrodes bloquantes tels que les supercondensateurs symétriques ou asymétriques, que nous testons actuellement. La nature du stockage d'énergie reste néanmoins identique dans les deux cas, c'est-à-dire électrostatique sans réactions faradiques. Aujourd'hui, la densité d'énergie d'un supercondensateur classique est de l'ordre de 2 à 4 Wh/kg et sa durée de vie est supérieure à 500 000 cycles. Les tests que nous conduisons actuellement sur les supercondensateurs asymétriques font apparaître une durée de vie de 100 000 à 300 000 cycles et une densité d'énergie de 10 Wh/kg.

Le second type de composants de stockage d'énergie, est à électrodes non bloquantes. Il comprend notamment les batteries électrochimiques. Dans ce domaine, nous avons utilisé dans le passé la batterie-plomb et, depuis quelques années, la batterie-lithium.

Notre premier projet d'hybridation électrique en 2005-2006 était basé sur des batteries-plomb et des supercondensateurs symétriques. Les inconvénients de la batterie plomb tiennent à l'effet peuckert, à une durée de vie dépendante du courant, à une faible récupération de l'énergie au freinage et à une très faible densité de puissance et d'énergie. Les supercondensateurs symétriques se caractérisent, eux, par une faible densité d'énergie, une densité de puissance importante, une durée de vie très longue et une grande stabilité thermique et électrique. Sur ce modèle, l'hybridation est assez simple. Nous avons placé un convertisseur entre les batteries et les supercondensateurs ainsi qu'un système d'energy management qui gère la distribution de la puissance entre les deux composants. L'idée consistait à fournir à la batterie, en cycle urbain, une puissance constante en décharge, l'excédent étant fourni par la supercapacité. Grâce à cela, nous avons pu minimiser l'effet peuckert, c'est-à-dire la dépendance des ampères-heures de la batterie au courant. Nous avons

également prolongé la durée de vie de la batterie, qui dépend fortement du courant. L'autonomie globale s'est améliorée de 20 à 30%.

Nous disposons aujourd'hui de véhicules tout-électrique. La question que nous nous posons est de savoir s'il convient d'utiliser ce système d'hybridation pour un véhicule alimenté par des batteries-lithium. Celles-ci ne présentent pas, en effet, les inconvénients des batteries-plomb, sauf en termes de durée de vie. Nous réalisons actuellement des essais pour tenter de l'améliorer. L'autre problème qui se pose est celui de la sécurité des batteries-lithium, qui ne doivent pas être portées à des températures trop élevées.

Notre second projet est le WATT (Wireless Alternative Trolley Technology), financé par l'ADEME, un démonstrateur verra le jour 2011. Le système consiste à charger un pack de supercondensateurs embarqué dans le bus par un système au sol pendant quelques secondes, à chaque arrêt de bus. Les supercondensateur au sol sont alimentés par le réseau électrique via un chargeur dont la puissance dépend du temps de parcours séparant deux stations consécutives. Pour un parcours d'une durée de trois minutes, le chargeur sera par exemple de 15 kW. En fait, lorsque le véhicule arrive à l'arrêt de bus, le biberonnage s'effectue grâce à un bras robotisé. Les supercondensateurs au sol charge le système de supercondensateurs embarqué dans le véhicule à une puissance de 300 à 400 kW pendant quelques secondes. Nous avons estimé le temps de charge à une dizaine de secondes et le temps de repliement du bras de charge à une dizaine de secondes également.

Dans ce type de véhicule, l'hybridation se fait entre la batterie et le supercondensateur. Au départ du parking, le premier mode consiste à utiliser les batteries et les supercondensateur. On peut limiter la batterie à une puissance constante et, grâce au supercondensateur, lisser le courant sur la batterie afin d'obtenir une durée de vie maximale. A l'arrivée à la première borne de recharge, le véhicule passe en mode principal qui permet de rouler infiniment sur le parcours du bus. Dans ce mode, la puissance de la batterie est nulle et le système fonctionne grâce aux supercondensateurs embarqués dans le véhicule. Il existe un troisième mode, dans le cas où le bus serait contraint de sauter une station de recharge, ce mode est assuré par la combinaison de la batterie et du supercondensateur. Enfin, dans le mode dégradé toute la puissance est fournie par la batterie, notamment en cas de problèmes sur les supercondensateurs. Etant donné qu'il s'agit d'une batterie-lithium, elle peut supporter la puissance nécessaire pour entraîner ce genre de véhicule. Le bus, en effet, mesure 12m de long et son moteur est d'une puissance de 140 à 160 kW. L'énergie embarquée par la batterie est de l'ordre de 80 kWh.

En conclusion, l'hybridation classique permet de minimiser la consommation de l'énergie de l'ordre de 15 à 30% en mode urbain et/ou de minimiser les émissions. L'hybridation électrique confère une plus grande autonomie au véhicule. Elle est même infinie dans le cas du système WATT. Selon nos calculs économiques, le système est rentable sur la durée de vie du véhicule. Cette solution devient donc de plus en plus pertinente, compte tenu de l'augmentation du prix du pétrole.

Questions/Réponses relatives à l'intervention de M. Hammar

De la salle

Le système que vous avez développé est, selon vous, rentable. Quelle est la différence de prix entre un bus normal et un bus hybride ?

Abderrahmane HAMMAR

Notre calcul tient compte de l'ensemble des coûts, c'est-à-dire notamment de l'évolution du prix du pétrole. L'infrastructure électrique est, de plus, financée par les collectivités locales à hauteur de 10 à 20%. Le prix de vente de notre bus est donc supérieur de 10 à 15% à un bus normal mais il reste rentable si on prend en compte l'ensemble des coûts, notamment des coûts de consommation énergétique.

Jean-Claude VANNIER, Supélec

Nous avons vu que des constructeurs tels que Toyota restent fidèles aux batteries nickel-métal-hydrure tandis que d'autres développent des solutions au lithium-ion. Vous avez souligné le risque d'emballement des batteries-lithium en l'absence d'une bonne gestion thermique. Avez-vous procédé à des essais ?

Abderrahmane HAMMAR

Nous avons réalisé des essais avec EDF sur les batteries-lithium. Nous en attendons encore les résultats mais ils s'avèrent à priori positifs. Nous utilisons des batteries lithium-fer-phosphate qui limitent le risque d'emballement thermique. Elles fournissent une plus faible densité d'énergie des batteries Li mais elles garantissent la sécurité, ce qui est prioritaire à nos yeux à partir du moment où nos véhicules embarquent deux tonnes de batteries.

Jean-Claude VANNIER

La capacité des supercondensateurs s'exprime en watt-heure par kilogramme. A quoi correspond précisément cette capacité, sachant qu'une batterie ou un condensateur ne se déchargent jamais à 100%, qu'il faut pouvoir récupérer de l'énergie et donc prévoir un minimum de tension aux bornes ? L'unité de mesure correspond-elle aux watts-heure totaux ou aux watts-heure utilisables ?

Abderrahmane HAMMAR

Il s'agit de watts-heure utilisables. Les supercondensateurs asymétriques, par exemple, ressemblent à la batterie. Ils ont une plage de tensions entre 2.2 V et 4.2 V et l'énergie correspond à cette plage de tension, ce qui est assez différent par rapport à une supercapacité ordinaire. Leur densité d'énergie s'établit donc entre 14 Wh/kg contre 4 Wh pour les supercapacités classiques.

De la salle

Avez-vous comparé les batteries-lithium aux nouvelles générations de batteries plomb-carbone ?

Abderrahmane HAMMAR

Non. Nous sommes une petite société et notre bureau d'étude ne compte qu'une dizaine de personnes.

De la salle

Comment prenez-vous en compte les normes des transports collectifs, vis-à-vis notamment des supercapacités embarquées, qui contiennent de l'acétonitrile ?

Abderrahmane HAMMAR

Nos véhicules embarquent actuellement une capacité de 1,4 kWh, ce qui correspond à un pack de supercondensateurs de 800 kg et donc à une quantité d'acétonitrile de 200 kg environ. Notre objectif est de nous aligner sur les normes appliquées aux batteries. Il n'existe pas à l'heure actuelle de norme, c'est à nous de fournir un dossier sur cet aspect et de montrer comment nous prenons en compte les problématiques de sécurité.

De la salle

Le véhicule que vous nous avez présenté est d'une puissance de 160 kW. J'imagine qu'il s'agit là d'une puissance en pointe et qu'elle s'établit en continu aux alentours de 10 kW ?

Abderrahmane HAMMAR

Le véhicule fonctionne toute la journée. Il consomme 160 kWh sur une plage de dix heures. La puissance moyenne efficace est d'environ 10 kW avec des pointes de courant lors des accélérations.

De la salle

Le moteur électrique a donc de très mauvais rendements lorsque le véhicule est en pointe. Ils sont tout de même meilleurs que ceux d'un véhicule à combustion interne et permettent une économie d'énergie importante. Utilisez-vous, dans vos projets, des machines électriques spécialement dimensionnées et optimisées ?

Abderrahmane HAMMAR

Trouver un moteur spécial à ce niveau de puissance n'est pas évident. La machine à cinq pôles peut fournir une telle puissance mais la question du coût se pose alors.

De la salle

Quels sont les fabricants des supercondensateurs asymétriques ?

Abderrahmane HAMMAR

Il en existe plusieurs. En France, le plus important est Bolloré, qui fabriquent des supercondensateurs de capacité de 2600 à 3000 Farad et proposeront bientôt des 9000 Farad. Le fabricant américain Maxwell fournit actuellement des capacités de 3000 Farad et propose la packaging complet et pas seulement le composant. Il existe également des producteurs sud-coréens, japonais et chinois...

Mutation de l'énergie hydraulique vers l'énergie électrique pour les avions

Florent NIERLICH
Messier Bugatti

I. La répartition énergétique à bord des avions

La société Messier-Bugatti est spécialisée dans la construction d'atterrisseurs et de systèmes de freinage pour avions. Elle s'intéresse, à ce titre, à la mutation énergétique dans ce secteur. Actuellement, il existe trois principales sources d'énergie à bord des avions : pneumatique, hydraulique et électrique. Elles sont toutes trois prélevées au niveau de la source principale que constitue le moteur de l'avion. L'énergie pneumatique est prélevée en sortie de l'étage de compression. Quant aux sources hydraulique et électrique, elles sont toutes deux prélevées mécaniquement à la sortie d'arbre du moteur par l'intermédiaire de relais d'accessoires.

Le conditionnement d'air-cabine, le dégivrage et le démarrage des moteurs sont les principaux utilisateurs de l'énergie pneumatique. Dans le cas de l'énergie hydraulique, il s'agit des servo-commandes hydrauliques pour les actionneurs de commandes de vol ainsi que l'ensemble des vérins hydrauliques de servitude pour les trains d'atterrissage, inverseurs de poussée et freins de l'avion. Le réseau de bord électrique est un réseau alternatif triphasé à fréquence fixe ou variable. Il existe également des réseaux 28V, recréés à parti des réseaux alternatifs par l'intermédiaire de transformateurs. Les principaux utilisateurs de l'énergie électrique sont les électropompes de secours, les actionneurs électromécaniques, l'avionique et les charges commerciales.

II. Vers une architecture tout-électrique

La transformation vers l'énergie tout-électrique s'effectue pas à pas. Elle a été mise en place sur l'Airbus A380, l'A400M et le Boeing 787. On parle aujourd'hui davantage d'avion « plus électrique » que d'avion « tout-électrique », celui-ci n'étant envisageable qu'à l'horizon 2020-2030. Il impliquerait une suppression des énergies hydraulique et pneumatique ainsi que des relais d'accessoires au profit de l'énergie électrique. L'alternateur serait ainsi directement intégré à l'arbre du moteur. Il y aurait création d'un réseau électrique à haute tension en continu, de type 270 Vdc. Le démarrage des moteurs, le dégivrage et le conditionnement d'air deviendraient électriques et nécessiteraient des charges de très forte puissance. Enfin, l'ensemble des actionneurs aurait l'obligation de devenir soit électro-hydrostatiques soit électromécaniques.

L'architecture tout-électrique consisterait à intégrer un starter-générateur à l'arbre-moteur et à créer plusieurs barres de bus d'essai haute tension alimentant toutes les sources de puissance de l'avion.

L'A380 constitue le premier pas significatif vers le « plus électrique ». Il se caractérise par l'introduction d'une fréquence variable allant de 400 à 800 Hz et une diminution du nombre de moteurs asynchrones au profit de moteurs synchrones à aimants permanents avec leur électronique de puissance associée. La puissance installée est de l'ordre de 400 KVA. L'architecture du système d'actionnement comprend deux réseaux hydrauliques classiques, dont les pompes sont entraînées

mécaniquement par le relais d'accessoires, et deux réseaux électriques ségrégués. Ce basculement vers un système énergétique mixte a nécessité l'introduction d'actionneurs électro-hydrostatiques de type EMA ou électromécaniques de type EMA et de générations hydrauliques locales visant à réalimenter les vérins hydrauliques. L'énergie pneumatique a néanmoins été conservée.

La société Messier-Bugatti a développé pour cet appareil des micro-généralions hydrauliques, qui ont permis de réalimenter les freins et le système de réorientation avant de l'avion. Il s'agit d'une électropompe à base de moteur à aimants permanents associée à une électronique de puissance. L'une des particularités de cette application est l'immersion du moteur électrique, afin d'éviter de placer un joint entre le moteur et la pompe.

Une autre application de type EMA présente sur l'A380 a été réalisée par la société Hispano-Suiza. Il s'agit d'un inverseur de poussée, composé de vérins électromécaniques entraînés en rotation par un auto-réducteur. Cette application représente une puissance d'une vingtaine de kilowatts.

Les commandes de vol de l'appareil sont un exemple d'application EHA, réalisée par la société Goodrich. Avec la mixité du réseau électrique, une grande partie des actionneurs de commandes de vol sont passés en mode électro-hydrostatique. Le vérin est composé d'un corps hydraulique classique sur lequel est greffé un moteur électrique ainsi que sa pompe et son électronique de puissance.

Le Boeing 787 est un autre exemple d'électrification. Il a fait ses premiers tours de piste l'été dernier. Au niveau du réseau électrique, les charges commerciales sont restées en 115 V tandis que les charges techniques de forte puissance sont alimentées par un courant alternatif de 230 V à fréquence variable. La puissance installée est de 1 MW, ce qui montre bien l'avancée du « plus électrique ». Il conserve néanmoins trois réseaux hydrauliques mais leur génération est principalement assurée par des électropompes en lieu et place des pompes entraînées par le réacteur. Des actionneurs EMA ont été introduits pour les commandes de vol et le freinage électrique. La grande différence par rapport à l'A380 réside dans la suppression de l'énergie pneumatique.

S'agissant du système de freinage électrique, qui est l'un des cœurs de métier de la société Messier-Bugatti, il est constitué de calculateurs qui génèrent des ordres de presse des disques de carbone. Ces ordres sont transmis à des boîtes d'électronique de puissance permettant de piloter les actionneurs positionnés sur le frein. L'ensemble des actionneurs va exercer un effort de presse sur les disques carbone constitués de rotors, qui tournent avec la roue de l'avion, et de stators, qui restent fixes. Cet effort de presse exerce un couple sur la roue et autorise le freinage de l'avion. La particularité d'un frein aéronautique réside dans la quantité de disques carbone qu'il nécessite.

III. Systèmes de trains d'atterrissage

Une partie importante de notre activité de recherche et technologie concerne les actionneurs électriques, relatifs notamment au système d'atterrissage. Il s'agit en effet d'un domaine où l'électricité n'est pas développée, en particulier pour la manœuvre du train et des trappes. Pour la manœuvre, un système de contre-fiches permet de maintenir le train d'atterrissage en position basse, tandis que le vérin permet de le relever et de le ranger dans la soute. La manœuvre du train se fait reste aujourd'hui exclusivement hydraulique et l'un des axes de nos recherches est de développer des actionneurs électro-hydrostatiques ou électromécaniques. Beaucoup de difficultés se

posent, étant donné qu'il s'agit d'une charge de plusieurs dizaines de tonnes et que le grippage est interdit.

L'autre d'application que nous recherchons concerne l'orientation de l'atterrisseur avant, qui permet de faire pivoter la roue avant afin d'améliorer la dirigeabilité de l'avion au sol. Des tentatives d'électrification de ce système ont déjà été réalisées pour les petits avions d'affaires mais jamais pour les gros avions civils. Plusieurs actionneurs électromécaniques d'atterrisseur sont en cours de réalisation et devraient entrer prochainement en phase de test. Nous travaillons, par exemple, sur un actionneur de manœuvre « full duplex », c'est-à-dire entièrement redondé électriquement et mécaniquement. Il prévoit une suppression du réducteur entre le moteur et la vis à bille, ce qui nous a contraints à d'importants efforts de recherche sur des motorisations de type fort couple/faible vitesse. Mécaniquement, il comporte un système de double vis concentriques, de manière à assurer la tolérance au grippage.

Nous développons également un actionneur d'orientation de la roue avant. Il s'agit d'un électromécanisme à rapport de réduction limité. Il existait en effet d'importantes contraintes de réversibilité au niveau de l'actionneur.

IV. Structure des composants électriques

L'actionneur hydraulique permet, aujourd'hui, un « direct drive » : la pression, de l'ordre de 200 bars, arrive directement sur le piston hydraulique. L'actionneur n'a donc pas à se soucier de la génération de puissance, qui est centralisée dans l'avion.

Le challenge de l'introduction d'actionneurs électriques de type EHA réside dans l'ajout d'une électropompe et d'une électronique de puissance. Dans le cas de l'EMA, il convient d'ajouter également un système de vis-écrou, de type vis-à-bille ou vis-à-rouleau. L'avantage de la technologie EHA est que, contrairement à l'EMA, elle ne craint pas le grippage puisqu'elle conserve un piston hydraulique. Cela explique notamment pourquoi cette technologie a été choisie pour les commandes de vol de l'A380. Afin d'améliorer la tolérance au grippage des systèmes EMA, il convient de développer une redondance de la chaîne de transmission, ce qui aggrave néanmoins la problématique de la surmasse de l'actionneur.

Nous sommes également assez actifs dans le domaine de la recherche sur les moteurs électriques. Les moteurs synchrones à aimants permanents constituent la technologie principalement utilisée. Il existe deux grandes catégories de moteurs électriques : les moteurs rapides de 5 000 à 15 000 tours minute, dans le cas d'EHA ou d'EMA à grand rapport de réduction, et les moteurs lents pour les actionneurs électromécaniques à faible rapport de réduction, notamment dans les cas où il est intéressant d'attaquer directement la vis.

En termes de structure de moteurs, on tend actuellement vers des machines à aimants à bobinage fractionné et couplage harmonique, c'est-à-dire comprenant un nombre différent de paires de pôles entre le stator et le rotor. Le bobinage est dentaire et les chignons très courts, ce qui en fait une machine très compacte. Les couples de détente sont faibles et chaque phase est indépendante, autorisant un fonctionnement dégradé en cas de perte d'une phase. En collaboration avec les universitaires, nous nous intéressons également aux moteurs à commutation de flux. Cette solution présente l'intérêt du rotor passif : les aimants sont situés au stator, entre les bobines. Elle comporte également un bobinage dentaire et donc des chignons assez courts. De par sa structure magnétique,

ce type de moteur ne souffre pas de posséder des encoches ouvertes, ce qui autorise des coefficients de remplissage très importants.

Les machines lentes ne constituent pas le domaine de prédilection des machines électriques. Nous développons néanmoins une recherche dans ce domaine, en partenariat avec l'Université de Montpellier, pour résoudre les problèmes de grippage d'actionnement. Ce type de machines provient historiquement des machines à réluctance variable, dans lesquelles des aimants ont été introduits afin de les rendre performantes. Elles permettent une fréquence de fonctionnement très élevée. Le nombre de pôles statoriques et rotoriques est, là encore, très différent, ce qui permet d'augmenter considérablement le nombre d'aimants sans augmenter proportionnellement les encoches au stator. Le fait d'accroître la fréquence du moteur permet de réduire la quantité de fer et de cuivre nécessaires à la fourniture du couple, et donc d'optimiser les masses actives.

S'agissant des technologies de l'électronique de puissance, nous utilisons des chaînes de conversion classiques. Un convertisseur AC/DC permet de redresser le réseau alternatif 115 V. Il se compose d'un système ATRU et d'une résistance de freinage, montée en parallèle sur le bus. Enfin, à l'autre extrémité de la chaîne de conversion, se trouve un onduleur DC/AC classique, à mode de commandes sinus ou trapèze. Dans le cas des solutions « full duplex », la partie électrique est entièrement redondée. Nous conduisons de nombreuses recherches dans ce domaine. Il est possible, par exemple, d'introduire une machine à double étoile, dans laquelle le stator est scindé en deux parties et qui permet d'assurer le fonctionnement même en cas de perte d'un onduleur. Cela pose de nombreux problèmes de reconfiguration et de gestion des différents types de défaut. Concernant les onduleurs, nous utilisons des technologies relativement classiques à base de modules. Un IGBT de tension 600 ou 1200 V est le type de transistor que nous privilégions. Le MOSFET est plutôt utilisé dans les applications basse puissance, notamment alimentées par des bus 28 V.

V. Localisation de l'électronique de puissance

L'avion est un endroit où l'électronique de puissance peut rencontrer des environnements sévères. La zone avionique, à la fois pressurisée et contrôlée en température, représente un environnement amical mais se trouve potentiellement très éloigné de l'actionneur. Le moteur électrique se situe, quant à lui, à l'extérieur du fuselage dans une zone sévère, non pressurisée et non contrôlée en température. Une autre solution consisterait à placer l'électronique de puissance à proximité du moteur mais il se trouverait alors lui aussi en zone sévère. C'est pourquoi, à l'heure actuelle, les solutions développées privilégient une localisation de l'électronique de puissance à distance du moteur. Néanmoins cette grande distance, et la présence de câbles qu'elle nécessite, posent de nombreuses difficultés. Elle engendre en effet des problèmes de compatibilité électromagnétique, avec le courant de mode commun dans les blindages, ainsi que des surtensions importantes du moteur, en raison de cette commutation de tension avec des pentes élevées, et par conséquent un vieillissement prématuré des bobinages du moteur. Il est donc nécessaire d'implémenter les filtres en sortie de l'onduleur afin de casser les pentes de commutation. L'introduction de ces filtres pose cependant des problèmes de masse et des problèmes thermiques. La grande distance de câble entre le moteur et l'électronique pose également problème. Nous avons réalisé des essais avec un câble de 25 m. Ils ont mis en évidence des surtensions importantes de l'ordre de 600 V, atteignant deux fois le bus de puissance, voire de 1000 V en phase de régénération, lorsque le moteur devient frein.

Afin d'éviter ces problématiques de câblage, il paraît intéressant de positionner l'électronique de puissance à proximité du moteur. L'environnement sévère reste, dans ce cas, une très forte

contrainte pour le boîtier de puissance. Nous réfléchissons actuellement à la possibilité de scinder le contrôle et la puissance, en ne gardant que la partie « switch de puissance » à l'arrière du moteur tandis que la partie « commande » serait située à distance. Le problème de la transmission de la commande se pose alors, qui pourrait éventuellement être résolu par l'introduction de la fibre optique. La scission de l'électronique de puissance présenterait, enfin, l'avantage de minimiser la quantité d'électronique en zone sévère.

Questions/Réponses relatives à l'intervention de M. Nierlich

De la salle

Vous avez évoqué le problème des environnements sévères et des fortes puissances. Avez-vous essayé les nouveaux semi-conducteurs à carbure de silicium ?

Florent NIERLICH

Actuellement, nous étudions de près ces technologies. Le groupe SAFRAN s'est doté ces dernières années d'un pôle de compétences en électronique de puissance. La vocation de ce pôle est d'étudier les technologies les plus avancées de transistor de puissance, notamment les solutions SiC. Le problème de ce composant est son état « normally on » alors que l'IGBT est, lui, « normally off ».

De la salle

Je suppose que l'instrumentation des actionneurs doit être influencée par les problèmes de compatibilité électromagnétique.

Florent NIERLICH

Nous rencontrons ce problème pour les capteurs. Il est possible, nous l'avons vu, de situer l'électronique de puissance à distance du moteur électrique. Mais le capteur, lui, est nécessairement positionné sur l'actionneur. Les technologies que nous utilisons actuellement pour les capteurs sont fiables mais la problématique de transfert de l'information demeure, notamment en cas de séparation de la commande et de la puissance. La fibre optique nous semble constituer une solution intéressante. Le choix se fera en fonction de la compatibilité de la technologie par rapport à l'environnement mais il existe déjà des exemples d'application de la fibre optique pour l'avion.

De la salle

Peut-on imaginer, dans un futur raisonnable, une alternative à la propulsion utilisant des hydrocarbures dans l'aéronautique ? D'autre part, vous avez justifié la poursuite de l'utilisation d'actionneurs hydrauliques en raison des problèmes de grippage. Pourtant, la seule solution totalement électrique que vous ayez présentée concerne le système de freinage. Comment expliquez-vous cela ?

Florent NIERLICH

Le freinage est une application où le grippage n'est pas catastrophique, contrairement aux applications pour commandes de vol. C'est pourquoi nous avons pu utiliser la technologie EMA sans introduire de redondance. L'occurrence d'un cas de grippage est de l'ordre de 10^{-7} ou 10^{-8} et le principal risque associé à un tel cas est l'éclatement du pneu. Or actuellement, l'occurrence de l'éclatement d'un pneu avec un système qui ne grippe pas est de 10^{-5} . Pour cette application, l'usage de l'actionneur est donc jugé acceptable.

Concernant votre question sur la propulsion, il est vrai qu'il est très peu question aujourd'hui de motorisation électrique. En revanche, la propulsion de l'avion au sol par des moteurs électriques situés dans les roues est un domaine très étudié. Ces solutions, appelées « green taxi », permettraient à l'avion de se mouvoir au sol sans utiliser ses réacteurs et impliqueraient une puissance de l'ordre de 100 à 150 kW pour une vitesse moyenne de 40 km/h.

Infrastructure hydrogène pour une mobilité durable

Françoise BARBIER
Air Liquide

I. Le contexte actuel et les challenges de la filière

Comme les précédents exposés l'ont montré, l'électricité prend une place de plus en plus importante dans les transports. Dans ce contexte, l'hydrogène utilisé comme carburant pourrait jouer un rôle-clé dans la mesure où, associé à une pile à combustible, il produit de l'électricité. Une telle utilisation de l'hydrogène suppose la mise en place d'une infrastructure de distribution pour le rendre disponible à l'utilisateur final. Il s'agit d'un challenge important mais des solutions existent, qu'Air Liquide entend développer.

Le groupe Air Liquide produit et distribue des gaz pour différents types d'applications industrielles, médicales ou environnementales. Il investit dans la recherche de solutions énergétiques, dont l'hydrogène-énergie fait partie intégrante. Nous sommes positionnés, depuis cinquante ans, comme un acteur majeur de l'ensemble de la chaîne de l'hydrogène dans ses applications industrielles. Depuis 2001, nous avons engagé un programme de recherche sur l'hydrogène-énergie et sommes présents sur toute la chaîne, depuis la production jusqu'à son utilisation dans la pile à combustible par le biais de notre filiale Axane.

L'enjeu de la mobilité durable nous impose de réduire les émissions de CO₂ et de diversifier les sources d'énergie. Plusieurs solutions coexisteront certainement à l'avenir, c'est pourquoi il est important de toutes les étudier aujourd'hui. Etant donné qu'il est propre, flexible, stockable et complémentaire à l'électricité, l'hydrogène en tant que vecteur d'énergie a toute sa place dans ces solutions.

La technologie alliant hydrogène et pile à combustible présente un bilan environnemental favorable. Un certain nombre d'études portant sur la chaîne complète ont été menées à travers le monde. Même si l'hydrogène est produit aujourd'hui à partir du gaz naturel, donc d'une énergie fossile, un consensus existe actuellement sur le fait qu'il permet, à son point d'utilisation, de réduire les émissions de CO₂ de 50% par rapport à un moteur à combustion classique. L'hydrogène constitue également le futur de l'hybridation. Il présente notamment l'avantage d'une recharge rapide et d'une plus grande autonomie.

Le véhicule à hydrogène est encore aujourd'hui à l'étape du prototype. Un certain nombre de programmes destinés à le développer sont néanmoins lancés dans différents pays, notamment au Japon et en Allemagne. Une majorité de constructeurs se sont fortement engagés et annoncent un début de commercialisation en 2015. Nous bénéficions également des premiers retours d'expériences, en termes de durée de vie, de rendement et d'autonomie, en provenance des trois cents prototypes en circulation. Au niveau des infrastructures, il existe actuellement quelques 170 stations à hydrogène dans le monde.

Un certain nombre de challenges se posent à la filière hydrogène-énergie. Au niveau de la production, il est nécessaire de développer des technologies qui n'émettent pas de CO₂. Il va également falloir mettre en place une infrastructure de transport, de stockage et de distribution

assurant l'accessibilité et la facilité d'utilisation de l'hydrogène à un coût acceptable. Il conviendra, enfin, de garantir la sécurité par le développement du cadre réglementaire.

II. L'infrastructure hydrogène aujourd'hui

La production actuelle s'établit à 630 milliards de mètres-cubes par an. A titre de comparaison, 8 millions de véhicules consommeraient environ 20 milliards de mètres cubes. L'hydrogène est aujourd'hui produit à plus de 95% à partir des énergies fossiles. Des développements destinés à mettre en place des modes de production plus propres et plus durables sont en cours. C'est le cas, par exemple, des solutions basées sur le reformage du gaz naturel, en assurant la capture et le stockage du CO₂, ou sur la gazéification de la biomasse. Des solutions envisagées à une échéance plus lointaine se fondent sur l'énergie nucléaire, en couplant la source de chaleur avec un électrolyseur haute température.

Le transport et la distribution d'hydrogène constituent un enjeu fort, puisqu'ils ont un impact à la fois sur le coût et sur le bilan environnemental de l'hydrogène. Les solutions doivent être optimisées en fonction du débit, de la distance et du mode de transport. La production est, aujourd'hui, centralisée et trois modes de distribution sont disponibles : le transport par camion sous une forme soit comprimée soit liquéfiée ou l'acheminement par canalisations sous forme gazeuse. Nous disposons de retours d'expériences sur ces trois modes. Le transport gazeux par canalisations se fait aujourd'hui par le biais de plusieurs milliers de kilomètres de tuyaux installés. Il est adapté à de très grands volumes d'hydrogène, puisque leur débit est de dizaines de milliers de mètres-cubes par heure. Il représente néanmoins un coût d'investissement élevé, tant par la nature des matériaux utilisés que par l'installation de l'infrastructure. Il reste pourtant l'option la moins coûteuse pour les volumes importants. Le transport gazeux par route se fait par camions chargés de tubes d'une dizaine de mètres, de cadres de bouteilles ou de bouteilles individuelles. La quantité d'hydrogène transportée s'élève à 300 kg en moyenne. Ce mode de transport est maîtrisé mais reste coûteux si l'on prend en compte l'achat, la maintenance et le coût de fonctionnement des camions. Il est donc adapté à de faibles quantités sur de courtes distances. Le transport liquide par route se fait par l'intermédiaire de citernes super-isolées capables de maintenir une température de -253°C . Elles transportent en moyenne 3 à 4 tonnes d'hydrogène. Les faiblesses de cette solution tiennent à la liquéfaction, qui nécessite un investissement coûteux et un coût énergétique important. Ce mode de transport reste adapté pour des quantités moyennes à grandes sur de longues distances.

Si l'on compare le bilan environnemental de ces trois modes, en termes d'émission de CO₂ par kilogramme d'hydrogène transporté, on s'aperçoit des limites du transport gazeux par route. En termes de bilan énergétique, des études du puits à la roue pour les véhicules à hydrogène ont également été menées, qui font apparaître un rendement énergétique de l'ordre de 30% contre 17% pour un véhicule à essence classique. Le bilan reste donc favorable pour le véhicule à hydrogène.

Nous disposons donc aujourd'hui de technologies maîtrisées pour distribuer l'hydrogène en fonction des volumes demandés. Elles ne sont pas encore totalement satisfaisantes et nécessitent des évolutions mais elles nous permettent d'ores et déjà de démarrer des applications hydrogène-énergie.

III. De l'hydrogène industriel à l'hydrogène-énergie

L'hydrogène-énergie présente un certain nombre de spécificités. Aujourd'hui la production est centralisée et dédiée à des applications industrielles, c'est-à-dire auprès de clients ayant un profil technique et assez regroupés. Le passage à l'hydrogène-énergie implique une évolution des technologies, un accroissement de la demande nécessitant une production à la fois centralisée et décentralisée et une clientèle composée du grand public dans une grande variété de lieux. Toutes ces contraintes nous incitent à développer de nombreux scénarios d'infrastructures, qu'il nous faudra optimiser au mieux, avec les bonnes technologies et au bon moment.

La mise en place d'une infrastructure dédiée s'avère indispensable, en particulier pour le transport et le stockage de plus grandes quantités. Elle devra s'efforcer d'améliorer l'efficacité de certains procédés comme la compression ou la liquéfaction afin de réduire les coûts. Elle devra prévoir également des modes de mise à disposition innovants destinés à un nouveau public dans le cadre de normes réadaptées.

S'agissant de l'accroissement des quantités transportées et stockées, des études sont actuellement en cours sur l'évolution des pipes permettant d'augmenter la pression de l'hydrogène et de développer de nouveaux matériaux, notamment composites. Des travaux sont également menés sur les camions afin de permettre le transport de plus grandes quantités d'hydrogène. Au niveau des bouteilles, Air Liquide s'attache à développer la pression pour atteindre un niveau de 700 bars.

Concernant la mise à disposition, nous travaillons à l'élaboration de petites cartouches d'hydrogène et d'un système d'échange « plein contre vide ». Un nouveau concept de connexions devra être mis en place permettant aux utilisateurs de réaliser cet échange sans être exposés à la haute pression. Nous testons actuellement cette technologie au sein d'un projet européen sur des petites flottes de véhicules de type utilitaire ou motorcycle. Quant aux stations services, il en existe 170 dans le monde, dont une quarantaine gérées par Air Liquide. Un certain nombre d'innovations ont dû être apportées afin de garantir un remplissage à haute pression qui soit rapide et sûr. Le protocole de remplissage est aujourd'hui parfaitement établi.

Le dernier point concerne l'optimisation de la chaîne hydrogène. Une modélisation de cette chaîne logistique et une analyse stratégique doivent être conduites pour déterminer de manière optimale le nombre, la capacité et l'emplacement des sites de production ainsi que les sources d'approvisionnement et les modes de transport. De nouveaux outils d'aide à la décision doivent être conçus afin de définir la structure logistique optimale pour un scénario donné.

IV. Transition vers une infrastructure hydrogène-énergie

Il existe, nous l'avons vu, une infrastructure déjà en place ainsi que des travaux en cours destinés à l'adapter sur le long terme aux applications de transport. Cette mutation nécessite néanmoins certaines étapes transitoires et notamment un soutien des pouvoirs publics pour le financement de cette nouvelle infrastructure. Ainsi la France a-t-elle lancé en 2009 un important programme appelé « Horizon Hydrogène-Energie » et portant sur les marchés de transition. Ce programme d'innovation, d'un budget de 200 millions d'euros sur sept ans, est cofinancé par OSEO et coordonné par Air Liquide. Il regroupe dix-neuf partenaires tant publics que privés et cible les marchés de transition, c'est-à-dire ceux d'ores et déjà accessibles et pour lesquels la technologie alliant hydrogène et pile à combustible apporte une valeur ajoutée. Ces marchés s'avèrent moins

contraignants en termes de performance, de coûts et de cadre d'utilisation. Il s'agit par exemple du marché de l'alimentation des groupes de secours, de l'alimentation des sites isolés tels que les relais de télécommunication et des flottes captives de véhicules industriels comme les chariots élévateurs ou les véhicules assurant le transport des bagages dans les aéroports.

Ce programme piloté par Air Liquide a pour finalité de bâtir une filière d'infrastructure hydrogène. Il vise à développer des technologies innovantes à la fois pour la production et la logistique de distribution sur différents marchés intermédiaires tout en préparant le cadre normatif afin de garantir leur acceptation sociale. L'infrastructure hydrogène-énergie se met donc en place pas à pas pour préparer un début de commercialisation en 2020 dans le domaine du transport.

Questions/Réponses relatives à l'intervention de Mme Barbier

De la salle

Vous avez dissipé certaines de mes inquiétudes concernant la sécurité de la technologie hydrogène. Néanmoins, quand on aborde le domaine du transport routier, le problème de la résistance du véhicule au crash se pose. Le transport de gaz à très haute pression risque d'aggraver ce point. Comment abordez-vous ces questions de sécurité ?

Françoise BARBIER

Cette question de la sécurité sert souvent à stigmatiser l'hydrogène alors qu'au début du vingtième siècle, le gaz de ville contenait 50 % d'hydrogène sans que cela ait provoqué d'accidents majeurs. Elle constitue néanmoins un axe de recherche très important pour nous. Au niveau de la bouteille haute pression, en particulier, nous travaillons de façon active sur les critères de qualification et sur des moyens de contrôle quotidien de ces produits afin de prévenir le risque de rupture des fibres de carbone. Nous étudions également leur résistance au feu et la possibilité d'installer une technologie de type « pressure relief device » fonctionnant tel un fusible thermique qui se déclenche pour éviter l'explosion de la bouteille en cas de haute température. Nous étudions enfin le risque en cas d'impact mécanique et, de manière plus générale, en cas de fuite. L'analyse du comportement de l'hydrogène en milieu confiné nous permettra ainsi de mettre en place les moyens *ad hoc*. Certes le risque existe, comme pour tout combustible, mais nous nous donnons tous les moyens pour le maîtriser.

De la salle

Pour assurer la sécurité, il faut donc que l'enceinte de confinement soit la plus étanche possible et que le véhicule soit le moins étanche possible. En vue d'application dans l'aéronautique, pouvez-vous nous dire si l'aluminium assure cette étanchéité ?

Françoise BARBIER

Dans un milieu confiné, l'exigence de sécurité impose de ne pas atteindre le seuil critique de risque d'inflammation de l'hydrogène. Il est alors envisageable de placer un système de ventilation

permettant d'éviter une concentration d'hydrogène supérieure à 4 %. La réponse passe donc par une analyse de l'environnement et la mise en place d'un système d'aération dimensionné.

L'énergie à bas carbone sur le campus du Plateau de Saclay

Jean-Marc AGATOR
Pôle d'animation scientifique Climat-Energie-Environnement
CEA

(Intervention non transmise)

Véhicule : accès à l'énergie et au réseau, approche système

Laurent SCHMITT
Alstom Power

Le groupe Alstom est positionné sur les aspects de la durabilité tant sur les questions de transport que d'énergie. Dans le domaine des transports, nos activités couvrent les trains à grande vitesse et le transport urbain. Dans le domaine de l'énergie, elles concernent aussi bien le thermique conventionnel que l'éolien et le solaire. Nous sommes également positionnés aujourd'hui sur la dépollution des centrales. Nous sommes donc exposés aux thématiques environnementales et énergétiques dans l'ensemble de ces activités. L'entité « Energy Management » d'Alstom Power, au sein de laquelle je suis responsable de la stratégie et de l'innovation, regroupe l'ensemble des activités liées aux automatismes, aux contrôles de commandes et aux systèmes d'information pour la gestion d'énergie dans les systèmes de centrales et, demain, dans les réseaux intelligents. Cette activité, lancée il y a plus de dix ans, pèse aujourd'hui près de 350 millions d'euros.

La raison pour laquelle la question de l'intelligence de l'énergie dans le système prend de plus en plus d'importance est liée aux discussions actuelles de la Conférence de Copenhague et aux contraintes environnementales qui vont en découler. En effet, si l'on prend en compte l'évolution prévisible du parc d'énergie installé entre 2005 et 2030, y compris en anticipant un redémarrage complet de l'industrie nucléaire, des gains drastiques dans l'efficacité des centrales et l'industrialisation d'une capture du CO₂ dans les centrales à charbon, les résultats obtenus sont encore loin des objectifs réclamés par les climatologues. Nous pensons, pour notre part, que des gains énergétiques significatifs peuvent être réalisés par l'optimisation et par la meilleure intégration de la production et de la demande. C'est ce que nous appelons le « smart power ».

Nous disposons, pour traiter cette question, de notre savoir-faire et de notre plate-forme IT, développée au départ pour les centrales nucléaires et progressivement étendue au monde de l'energy management. Notre ambition est donc de devenir l'un des acteurs futurs du green IT. Les solutions que nous proposons s'avèrent pragmatiques. Elles partent de solutions existantes que nous faisons évoluer vers de nouveaux besoins. Il s'agit de logiciels d'optimisation énergétique d'un portefeuille de centrales ou de composants permettant leur supervision fine. Pour qui veut agir sur le système, il convient en effet d'intervenir au niveau des actionneurs du réseau, c'est-à-dire principalement des centrales. Equilibrer le système énergétique revient, en grande partie, à interagir en temps réel avec l'ensemble des centrales. Or celles-ci sont actuellement en train d'évoluer vers une plus grande diversité énergétique. En partenariat avec Bouygues, nous travaillons également à l'intégration du renouvelable et de la gestion de l'efficacité énergétique dans le bâtiment. Si l'on prend l'exemple de l'énergie solaire, alors que les régulateurs ont aujourd'hui tendance à réinjecter cette énergie dans le réseau, nous pensons qu'il est plus intéressant, d'un point de vue énergétique d'ensemble, de synchroniser au mieux ce qui est produit localement en stockant une partie dans le bâtiment et en gérant pour le reste les interactions avec le réseau intelligent. La recherche dans ce domaine s'effectue en collaboration avec les acteurs des systèmes d'information du type SSII. Nous avons ainsi développé un partenariat avec Microsoft pour les outils logiciels d'aide à la décision.

Il existe, de ce point de vue, de nombreux challenges liés au véhicule électrique. Un principe électrique et électrotechnique du monde de l'énergie veut que la somme de ce qui entre en temps réel dans un réseau électrique soit équivalente à la somme de ce qui en sort. Si davantage

d'intermittence est introduite, par le biais d'une énergie renouvelable par exemple, alors il est nécessaire de prévoir des générations de back-up supplémentaires afin de stabiliser le système à chaque milliseconde.

Le système rencontre, d'autre part, des limites physiques au niveau des différents nœuds du réseau. Il n'a pas du tout été conçu pour gérer des flux bi-directionnels jusqu'au plus bas niveau des moyens de consommation d'énergie. De manière schématique, ne sont pilotées aujourd'hui que les grandes centrales connectées au réseau de transport, en faisant une estimation des consommations des usagers finaux et sans se soucier du fonctionnement du réseau de distribution. L'un des objectifs du smart grid est donc de connecter et de piloter des éléments se trouvant dans des couches beaucoup plus basses du réseau.

Il faut également tenir compte de la dérégulation du monde de l'énergie. Ainsi, la société assurant la génération est différente de celle qui en assure la commercialisation. Ces sociétés sont concurrentes et réalisent des échanges d'énergie sur le marché en temps réel. Le véhicule électrique connecté au réseau doit donc être capable de gérer les flux financiers associés à cette dérégulation. Que je le connecte chez moi, au bureau ou chez un ami, le véhicule électrique doit être en mesure de reconnaître quel est mon fournisseur d'énergie afin d'assurer la facturation associée.

La dérégulation provoque une seconde contrainte : celle de la fluctuation des prix selon la saison, selon la journée et selon son profil. Aux Etats-Unis, une étude a ainsi montré que ces prix peuvent varier, en l'espace de trois heures, de 20 à 1000 dollars. Si un véhicule électrique se connecte lors d'un tel pic, non seulement le chargement s'effectuera à partir d'une énergie carbonée mais il sera en outre nécessaire d'alimenter le back-up en ces mêmes énergies. L'intérêt d'une communication entre ces deux composants du système est donc flagrant.

D'autre part, le protocole de Kyoto nous impose de suivre de manière très fine les émissions de CO₂ en cas de dépassement des certificats obtenus par les centrales. Il est donc nécessaire de faire le lien entre la qualité et l'empreinte carbone de l'énergie fournie dans le système et la stratégie de chargement du véhicule électrique. En effet, un véhicule électrique qui ne serait pas conçu intelligemment dans ses interactions avec le système aurait un intérêt environnemental moindre.

La mise en place d'un réseau intelligent permettrait de redéfinir la manière dont le système électrique est géré. Des relations doivent être établies entre les moyens conventionnels thermiques, des moyens renouvelables de plus en plus intermittents et les impératifs liés à l'introduction du véhicule électrique. La régulation s'opérera par le biais d'une centrale virtuelle venant positionner l'agrégation d'un certain nombre de demandes dans le cadre d'un marché dérégulé fournissant des prix en temps réel. Dans cette configuration, le gestionnaire de centrale virtuelle aura un rôle d'optimisation et de gestion des flux financiers associés. Il s'agit, en définitive, de mettre en place un gigantesque système d'information dont il convient d'intégrer les différentes composantes. On se trouve dès lors confronté au problème de la standardisation. Les Etats-Unis ont récemment réalisé une analyse exhaustive des standards de référence existant aux différents niveaux du système. Un véritable effort d'harmonisation reste à faire, qui devrait selon nous se baser sur les standards votés dans le cadre de l'IEC.

L'enjeu de la mise en place de ces réseaux intelligents consiste aussi à gérer le système d'energy management global dans le réseau : qui prend la décision de faire quoi et à quel niveau ? Aujourd'hui la gestion du système énergétique se fait par l'optimisation de l'ensemble du réseau selon différents horizons temporels. Une optimisation de 80% du portefeuille est établie un jour à

L'avance puis une redéfinition des stratégies d'optimisation s'opère à l'intérieur de la journée en fonction des erreurs de prévision et des problèmes de production qui surviennent. Une telle organisation n'est pas adaptée à l'introduction du véhicule électrique et à la multiplication des points de connexion qu'elle générera. Le smart grid, lui, effectuera une optimisation globale du réseau et diffusera les prix aux différents acteurs, qui viendront s'optimiser en fonction. Le problème est de déterminer le niveau auquel il est intéressant de diffuser les algorithmes pour bénéficier d'une technologie optimale à la fois décisionnellement et économiquement. Pour nous, l'échelle adaptée est celle de l'éco-quartier ou du bâtiment, qui est un composant très important l'ensemble des nœuds nécessaires au pilotage du smart grid. A l'avenir, en effet, le bâtiment bénéficiera d'une énergie distribuée, d'une interface avec le système, de capacités de stockage (dont le véhicule électrique) et rassemblera des utilisateurs. Le bâtiment va donc devenir une centrale de production, qu'il sera nécessaire de dispatcher dans le système. Nous cherchons actuellement à prototyper, dans le cadre d'un bâtiment donné, la création d'une nouvelle couche purement logicielle de gestion et d'optimisation énergétique. Cette évolution nécessite de nouvelles technologies et un changement du cadre réglementaire, concernant notamment l'énergie solaire.

Dans le contexte du Plateau de Saclay, nous avons d'ailleurs créé, en partenariat avec le Pres *UniverSud Paris* et de grands industriels extrêmement complémentaires, une chaire sur la thématique de l'éco-innovation dans le domaine des éco-quartiers. Notre objectif est de monter, dans les cinq prochaines années, un éco-quartier démonstrateur sur lequel nous pourrons prototyper un certain nombre de technologies ayant le smart grid comme colonne vertébrale.

Questions/Réponses relatives à l'intervention de M. Schmitt

De la salle

Peut-on arriver, dans un système dérégulé, à une optimisation suffisante pour la satisfaction des besoins des utilisateurs ?

Laurent SCHMITT

On ne cherche pas actuellement des innovations de rupture sur des micro-composants du système mais une innovation de système. Un élément favorable vient du fait que beaucoup de technologies existent aujourd'hui pour faire fonctionner le système de manière optimale, à condition de s'affranchir des contraintes réglementaires. La dérégulation complexifie significativement le système. L'objectif de nos projets démonstrateurs est de mettre en avant le fait que le système devra évoluer dans son ensemble d'ici 2020 ou 2030 ainsi que le cadre législatif. A l'heure actuelle, en effet, les technologies d'optimisation sont disponibles mais la dérégulation génère des comportements fortement sub-optimaux dans le smart grid. La problématique du véhicule électrique ne se résume donc pas uniquement à des questions d'ordre technologique mais doit prendre en compte l'ensemble de ces aspects.

De la salle

Le véhicule électrique est-il intégré à l'éco-quartier que vous souhaitez développer et comptez-vous l'utiliser comme moyen de stockage ?

Laurent SCHMITT

L'éco-quartier est envisagé de manière holistique. On considère l'énergie, le transport et la minimisation des émissions de CO₂ au sein d'une vision intégrée. Dans cette simulation, nous avons en effet prévu une interaction du véhicule électrique avec le réseau intelligent. Nous discutons actuellement de cette thématique avec de nombreux constructeurs. Leur avis diverge de manière importante. Certains restent attachés à une conception de la batterie comme un service vendu à l'utilisateur final. D'autres réfléchissent à des solutions dans lesquelles la gestion de la batterie passe sous le contrôle du fournisseur d'énergie.

De la salle

Pouvez-vous nous en dire plus sur le partenariat Microsoft ?

Laurent SCHMITT

Microsoft a annoncé le lancement d'une nouvelle architecture de référence ayant une approche beaucoup plus pragmatique. Elle part du principe qu'on dispose aujourd'hui d'un certain nombre d'outils concernant l'environnement bureautique back-office IT habituel des énergéticiens. Elle constate ensuite une complexité du *middleware* reliant le back-office IT et les technologies de contrôle et de pilotage dans les centrales. Elle propose, enfin, un guideline destiné à simplifier ce middleware et à faire en sorte que les utilities travaillent davantage sur les applications critiques pour le smart grid plutôt que sur une intégration logicielle, qui est d'un faible intérêt en termes fonctionnels.

Allocution de clôture

Jean-Claude VANNIER
Chef du Département d'Electrotechnique et de Systèmes d'Energie
Supélec

Nous avons vu ce matin les aspects liés au véhicule terrestre à travers l'approche de Renault, principalement tournée vers le véhicule électrique, et celle de PSA, davantage axée sur l'hybridation. Les deux approches sont complémentaires mais les deux constructeurs n'accordent pas la même priorité à chacune.

La société Valeo nous a présenté une approche encore plus concrète puisque des produits, tels que le Start&Stop, existent et que des efforts sont actuellement menés pour les rendre plus accessibles sur différentes gammes de véhicules. L'exposé de la société PVI, qui fabrique des applications de moteurs électriques pour les véhicules industriels, nous a montré que les solutions à base de véhicule électrique étaient parfaitement diffusées et donc compétitives.

Nous avons vu, cet après-midi, les bienfaits que pouvait apporter l'énergie électrique en remplacement de l'hydraulique dans le domaine non pas de la propulsion mais des servitudes dans le cadre d'application dans l'aéronautique avec Messier-Bugatti. L'exposé de la société Air Liquide a permis un élargissement de la problématique à la filière hydrogène tout en illustrant par des réalisations allant jusqu'aux stations-services à H₂ tandis que l'intervention de Jean-Marc Agator a souligné les enjeux d'une vision d'ensemble des aspects stratégiques comme celle menée par le Pôle Climat Energie Environnement, PCEE, du Plateau de Saclay.

Les objectifs du colloque me semblent ainsi avoir été parfaitement atteints grâce à la qualité et à la diversité des interventions et je remercie Ile de Science ainsi que l'ensemble des intervenants et des participants qui ont permis à cette journée d'être très riche en enseignements.