

L'électrification du transport routier

L'électrification de la motorisation des véhicules permet d'apporter un certain nombre de fonctionnalités conduisant à une réduction de la consommation d'énergie. Celle-ci est obtenue en optimisant les conditions de fonctionnement du moteur thermique et en récupérant une part variable de l'énergie disponible au freinage, dans des hybrides que l'on qualifiera ci-après de « discrets ». Les systèmes les plus simples, qui autorisent la suppression du ralenti, conduisent à des gains en consommation de 5 à 7 % sur le cycle normalisé européen. Les systèmes les plus complexes, qui permettent plus de fonctionnalités, entraînent des gains pouvant atteindre 40 %.

L'électrification permet également de créer des fonctionnalités additionnelles, au bénéfice des utilisateurs du véhicule ou de la collectivité, telle l'autonomie tout électrique ou la connexion au réseau électrique.

La mise en œuvre de ces fonctionnalités va nécessiter l'introduction de machines électriques qui vont être couplées à la motorisation thermique selon différentes architectures, série, parallèle, série-parallèle, voire tout électrique et vont pouvoir s'intégrer plus ou moins aux composants existants (boîte de vitesses ou roue).

Les annonces des différents constructeurs et équipementiers laissent penser que l'électrification des véhicules pourrait s'accélérer dans le futur et constituer une opportunité dans un contexte économique et environnemental difficile actuellement. Le niveau d'électrification des véhicules diffusés dépendra alors des succès obtenus dans la maîtrise du stockage d'énergie, des coûts et de l'industrialisation.

Contexte

Le rôle des gaz à effet de serre (GES) dans le phénomène du changement climatique est maintenant bien admis. Les transports, et particulièrement les transports routiers, représentant une part importante des émissions de GES, des réglementations très contraignantes vont être appliquées à court terme dans leur domaine.

Dans ce contexte, l'électrification des transports routiers sera une des voies possibles agissant au niveau du véhicule lui-même (motorisation, auxiliaires) ou de la filière énergétique (vecteur électricité).

Situation des véhicules à motorisation conventionnelle

Celle-ci peut être illustrée à travers les trois exemples détaillés ci-après.

L'électricité à bord

La fonction première de la motorisation d'un véhicule est d'en assurer le déplacement. On peut cependant faire les remarques suivantes :

- l'augmentation très importante du nombre des fonctions assurées à bord, dans les domaines du confort, de la

L'électrification du transport routier

sécurité et des communications a conduit à une augmentation du nombre des actionneurs électriques et en conséquence de la puissance du réseau de bord. Ainsi cette puissance a dépassé les 1000 W dès les années 1980, a doublé dès l'an 2000 et pourrait atteindre près de 5000 W en 2010,

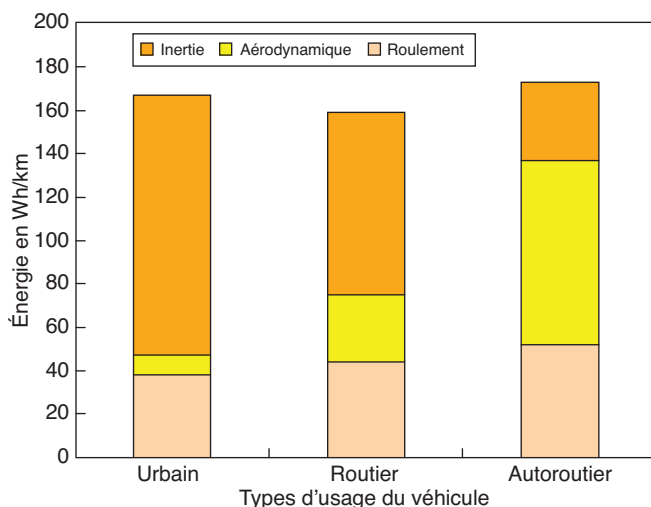
- les puissances moyennes mises en jeu pour assurer le déplacement d'un véhicule sont inférieures à 10 kW pour des trajets urbains sur plat et de fait sont du même ordre de grandeur que celles du réseau électrique de bord.

Cette convergence dans les niveaux de puissance indique que, pour certains types d'usage, il peut devenir intéressant de faire intervenir l'énergie électrique dans la motorisation du véhicule.

Les énergies mises en jeu

Si l'on considère les flux d'énergie mis en jeu pour un véhicule circulant sur une route plate, on constate que celui-ci est soumis à trois forces correspondant à l'aérodynamique, au roulement et aux inerties. L'énergie associée aux deux premières forces est de type dissipatif et est perdue sous forme de chaleur. La troisième force est un potentiel qui peut être récupéré lors de chaque décélération du véhicule. L'analyse de ces flux montre que le potentiel d'énergie récupérable en conditions urbaines est extrêmement important (figure 1) et qu'il se réduit rapidement lorsque les conditions de circulation deviennent plus fluides¹.

Fig. 1 - Exemple de répartition des énergies suivant les usages, pour un véhicule particulier



[1] Le génie électrique automobile : La traction électrique : Alleau T., Badin F., Beretta J., Bleijs C., Bonal J. (2005). Hermès Science, Traité EGEM - Série Génie électrique. Paris : Lavoisier, 340 p. ISBN 2-7462-1094-0.

Conditions d'utilisation du moteur thermique

L'analyse des conditions de fonctionnement du moteur thermique montre que celles-ci sont très sensibles à l'usage qui est fait du véhicule. On observe en effet des faibles régimes et charges en conditions urbaines avec en conséquence des rendements peu élevés, alors que pour des conditions routières et autoroutières les zones de fonctionnement sont proches des meilleurs rendements du moteur.

Si l'on considère l'usage du véhicule lui-même, il apparaît qu'un nombre important de ses parcours est réalisé avec un moteur et un système de traitement des gaz d'échappement qui ne sont pas à une température optimum. En effet, selon l'ADEME, 50 % des trajets en voiture sont inférieurs à 3 km. Ces usages vont entraîner une augmentation importante de la consommation, des émissions de polluants et de CO₂.

Comme nous le verrons ci-après, l'électrification de la motorisation sera un moyen d'améliorer sensiblement les conditions d'usage des moteurs thermiques et de réduire en conséquence leurs nuisances.

Fonctionnalités apportées par l'électrification

Les différentes fonctionnalités listées ci-après sont implémentées dans le véhicule avec comme objectif principal la recherche d'une réduction de la consommation de carburant. Ces véhicules, que l'on pourra qualifier d'*hybrides discrets*, ne présenteront pas d'autres apports, à la différence de ceux dont les fonctionnalités sont présentées ci-après sous l'intitulé « Fonctionnalités complémentaires ».

Gestion optimisée de l'énergie électrique de bord

La production d'électricité à bord des véhicules conventionnels est réalisée par l'intermédiaire d'un alternateur entraîné par une courroie et débitant dans un pont redresseur à diodes pour alimenter le réseau 12 V de bord. Jusqu'à ces dernières années, un tel système était optimisé principalement en fonction de son coût, au détriment du rendement global, limité entre 50 et 60 %. L'augmentation de la puissance du réseau de bord et la recherche d'une consommation minimale ont conduit les équipementiers à améliorer la machine, son électronique et son pilotage.

Dans un système optimisé, l'énergie délivrée par l'alternateur n'est pas uniquement liée à la consommation sur le réseau de bord mais peut être phasée avec l'utilisation du véhicule. La recharge de la batterie est ainsi privilégiée

L'électrification du transport routier

lors des décélérations, quand le moteur thermique est entraîné par les roues, avec un objectif de réduction de la consommation, en récupérant une part — même encore très faible — de l'énergie en décélération.

Une telle approche est certes limitée dans ses effets mais son coût est très réduit et elle pourrait être massivement diffusée à court terme.

Système Stop&Start

La fonctionnalité implémentée dans ce système, également dénommé *micro hybrid*, est l'arrêt du moteur thermique lorsque celui-ci ne produit pas de force motrice pour le véhicule, c'est-à-dire essentiellement la suppression des phases de ralenti. Le gain en consommation de carburant, et en émission de CO₂, sera donc d'autant plus important que ces phases représentent une part significative des conditions de roulement. En effet, pour un véhicule de gamme moyenne, si le gain mesuré est de 5 à 7 % sur le cycle normalisé européen MVEG, il pourra atteindre de 10 à 15 % sur un cycle typé urbain et sera négligeable pour un usage typé autoroutier.

La mise en œuvre de cette fonctionnalité nécessitera l'obtention d'un démarrage sûr, propre (vis-à-vis des polluants réglementés), rapide (quelques 1/10 de s), silencieux, sans vibrations et automatisé du moteur thermique (lié à une action du conducteur sur les pédales). Celui-ci est réalisé par une machine plus puissante qu'un démarreur (2 à 4 kW), qui pourra être liée par courroie au moteur thermique et utilisée également comme générateur, tels les systèmes alerno-démarrateurs *Stop&Start* diffusés par Valeo sur les Citroën C1 et C2 ainsi que sur la *Smart Fortwo MHD* de Daimler-Benz. La mise en action du moteur thermique pourra également être assurée par un démarreur renforcé, tel le système proposé par l'équipementier Bosch.

Ces systèmes conservent un stockage d'énergie électrique à partir de batteries 12 V au plomb optimisées et leur surcoût est limité à quelques centaines d'euros. Ils sont actuellement implémentés sur des véhicules plutôt typés urbains où le gain en consommation pourra être maximal.

Système Stop&Start avec récupération d'énergie au freinage

Ces systèmes sont dérivés des précédents mais utilisent une machine plus puissante (4 à 6 kW entraînée par courroie) et un stockage associant une batterie au plomb et des supercondensateurs. Cette configuration permet de récupérer une part de l'énergie disponible lors des freinages et de démarrer des moteurs de plus grosse cylindrée en essence et diesel, et donc d'envisager

une diffusion plus massive dans la gamme des véhicules. Des premiers résultats très satisfaisants ont été obtenus par Gruau² et Valeo avec le système *STARS+X* sur un *Microbus* de 22 passagers dans le programme *Prédit3 Micro-Carré*.

La récupération d'énergie au freinage permet d'augmenter le gain en consommation qui pourra alors atteindre pour un véhicule particulier 10 à 12 % sur le cycle normalisé. La présence des supercondensateurs permet de faire travailler la machine à une tension plus élevée (42 V) mais nécessitera l'utilisation d'un convertisseur continu-continu (DC/DC) afin d'alimenter le réseau 12 V des auxiliaires de bord.

L'utilisation d'une machine plus puissante et de nouveaux composants (supercondensateurs, convertisseur) va renchérir le coût de ce système (de l'ordre de 500 à 900 €) qui ne pourra pas être diffusé aussi rapidement que le précédent.

Assistance au moteur thermique

Dans cette configuration (dénommée *mild hybrid*), l'utilisation d'une machine électrique plus puissante (10 à 20 kW) va permettre, en plus des fonctions précédentes, d'assister le moteur thermique en fournissant un couple additionnel durant les phases motrices (mode également dénommé *boost*). La courbe de couple obtenue en associant moteur thermique et machine électrique permettra de conserver de bonnes performances dans les faibles régimes, à l'image d'un moteur diesel suralimenté, tout en utilisant un moteur essence associé à une forte réduction de cylindrée (*downsizing*), comme cela est illustré en figure 2.

Le constructeur Honda diffuse cette configuration avec son système IMA implémenté sur l'Insight et sur la Civic. La machine électrique, qui est caractérisée par un très fort rapport diamètre sur longueur, est montée en bout de vilebrequin, en lieu et place du volant d'inertie du moteur thermique, et donc logée entre celui-ci et la transmission (voir figure 3). Pour ce niveau de puissance, la tension du stockage sera généralement de 120 à 150 V avec une énergie totale inférieure à 1 kWh. Pour ce véhicule, par rapport à son équivalent à motorisation essence, le gain de consommation est de l'ordre de 30 % en conditions urbaines, de 15 à 25 % sur le cycle normalisé européen MVEG et très faible en conditions extra urbaines.

Le surcoût de ce système sera plus élevé avec une fourchette de 1000 à 2200 €.

[2] *Micro², une hybridation accessible* : Y. Peurou Gruau, G. Menou Valeo - 4^e Journées d'études sur les bus propres, Lille 24 et 25 septembre 2007.

L'électrification du transport routier

Fig. 2 - Caractéristique de couple avec et sans moteur électrique, Honda Insight 2000 (d'après ³⁾)

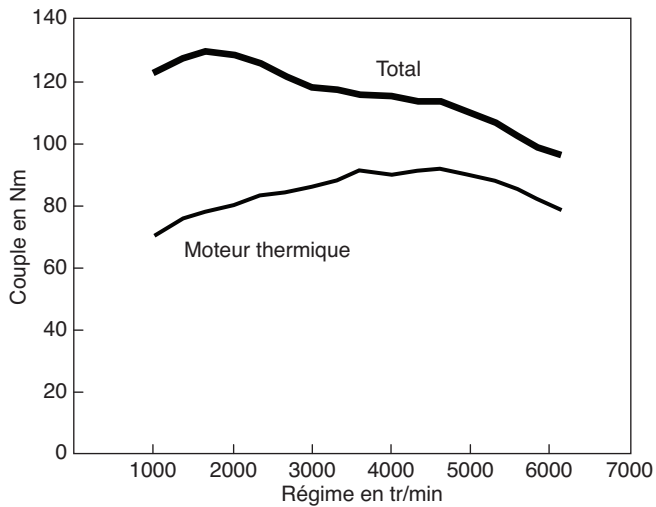
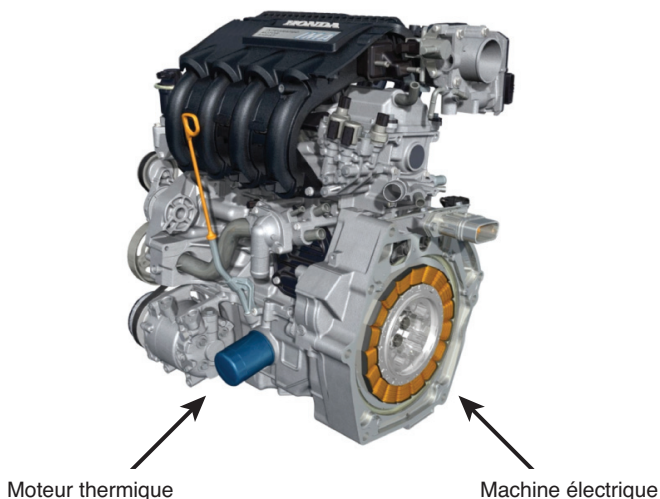


Fig. 3 - Montage sur le moteur thermique dans l'Insight 2008 (document Honda)



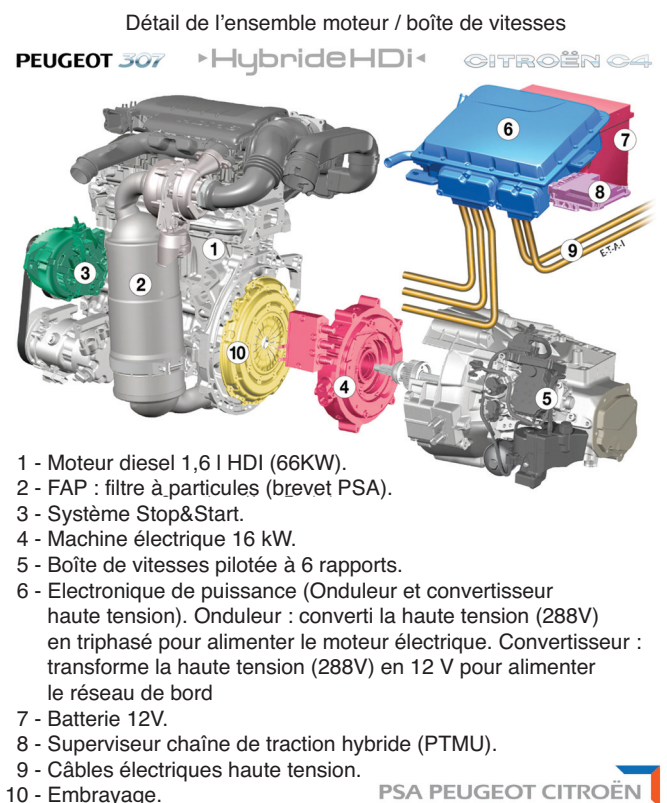
Mode tout électrique

Cette fonctionnalité correspond à un usage possible du véhicule à partir de sa motorisation électrique seule, c'est-à-dire que le moteur thermique pourra être isolé de la transmission et stoppé durant ces phases. Ce type de configuration, dite *full hybrid*, offre beaucoup plus de possibilités d'optimisation dans le fonctionnement du moteur thermique puisqu'une grande part des situations défavorables pourra être réalisée en mode tout électrique. La motorisation électrique sera ici plus importante avec une machine de 20 à 50 kW et un stockage ayant une tension de 200 à 300 V et une énergie totale de 1 à 2 kWh.

⁽³⁾ Development of integrated motor assist hybrid system : Development of the 'Insight', a personal hybrid coupe : K. Aoki, S. Kuroda, S. Kajiwara, H. Sato, Y. Yamamoto, Honda R&D Co, Ltd : SAE paper 2000-01-2216, Government/Industry meeting, Washington DC, June 19-21 2000.

La figure 4 illustre la disposition des composants sur le prototype *Hybrid-HDI* de PSA, on peut notamment remarquer l'embrayage (10) qui permet d'isoler le moteur thermique de la transmission pour permettre les modes électriques ainsi qu'une récupération au freinage beaucoup plus efficace énergétiquement puisque l'on pourra éliminer les pertes par frottement du moteur thermique (ce qui n'était pas possible sans la fonction tout électrique).

Fig. 4 - Motorisation Hybrid HDI de PSA (document PSA)



Le degré d'optimisation très important que l'on pourra avoir dans l'usage du moteur thermique va conduire à l'obtention de gains en consommation extrêmement élevés, jusqu'à 40 % en conditions urbaines, où les motorisations conventionnelles sont mal exploitées. Ces gains relatifs vont se réduire, entre 10 à 20 % en conditions routières pour devenir presque négligeables sur autoroute. La complexité de ce système et le dimensionnement de ses composants induit cependant un surcoût important qui est estimé aujourd'hui entre 2500 et 5000 €. Le véhicule hybride le plus diffusé à ce jour, la Prius de Toyota, implémente toutes ces fonctionnalités.

On notera que l'implémentation du mode tout électrique nécessite que tous les auxiliaires du véhicule soient

L'électrification du transport routier

électrifiés, notamment ceux entraînés ordinairement par le moteur thermique (climatiseur, assistance de frein).

Gestion optimisée

La mise en œuvre de ces différents modes de fonctionnement doit être réalisée de façon dynamique au cours de l'usage du véhicule et prendre en compte l'état des différents composants, la charge du système de stockage d'énergie notamment. Cette gestion complexe ne peut être laissée à l'initiative du conducteur, en conséquence, constructeurs, équipementiers et laboratoires de recherche ont développé des logiciels complexes dédiés à la gestion des motorisations hybrides.

L'objectif est d'assurer une gestion et un pilotage optimaux des composants afin de minimiser la consommation d'énergie du véhicule tout en préservant ses performances et en améliorant si possible son agrément de conduite. Dans un futur proche, ces lois de gestion pourraient prendre en compte des paramètres de l'environnement du véhicule comme les conditions de circulation ou le relief, ainsi que des paramètres d'exploitation pour les flottes.

Fonctionnalités complémentaires

Les fonctionnalités listées ci-après permettront à un véhicule hybride, que l'on pourra qualifier d'*hybride fonctionnel*, de présenter un ou plusieurs avantages, au bénéfice du conducteur, des passagers, de l'environnement local ou global.

De telles fonctions additionnelles devraient permettre de valoriser le surcoût du véhicule lors de ses usages (pénétration en centre ville interdit aux véhicules polluants) ou de réduire son coût énergétique (utilisation d'un autre vecteur énergétique).

Mode électrique avec autonomie

Ce mode est complémentaire du mode électrique déjà présenté au paragraphe « Mode tout électrique », il s'en distingue par le fait que l'arrêt du moteur thermique pourra être décidé par le conducteur, ou éventuellement par une infrastructure extérieure, et maintenu sur une distance donnée (*all electric range* ou *AER*, de l'ordre de 5 à 20 km pour l'Europe, jusqu'à 60 km envisagés aux Etats-Unis). Les performances dynamiques du véhicule dans ce mode seront donc liées à la puissance disponible sur la machine et la batterie (20 à 50 kW) et l'autonomie à l'énergie contenue dans la batterie (5 à 20 kWh au total).

Ce fonctionnement sans nuisances locales permet d'envisager des usages particuliers des véhicules comme la distribution de nuit dans les centres-villes.

Connexion au réseau électrique

Recharge réseau

Dans un hybride de type discret, l'état de charge de la batterie (*state of charge* ou SoC, conventionnellement 100 % à l'état chargé et 0 % à l'état déchargé) est constamment maintenu autour d'une valeur moyenne (généralement 50 à 60 %, mode dit *charge sustaining*), dans le cas de la recharge réseau le système de gestion de l'énergie laisse dériver le SoC (mode dit *charge depleting*) jusqu'à atteindre une valeur limite déterminée généralement par rapport au vieillissement et aux performances (de l'ordre de 20 %). La batterie peut alors être rechargée sur le réseau (hybride dit *plug-in*). Les remarques suivantes peuvent être faites :

- la décharge de la batterie peut être réalisée progressivement au cours de l'utilisation en minimisant l'usage du moteur thermique qui interviendra principalement pour assurer les performances dynamiques (mode dit *blended*). Ce fonctionnement est moins demandeur en dimensionnement pour le système électrique, mais le véhicule ne dispose pas d'*AER*,
- la décharge batterie peut être réalisée en implémentant la fonctionnalité d'autonomie électrique (*AER*). Ce choix a été retenu notamment par GM dans son véhicule Volt qui présente une autonomie de l'ordre de 60 km grâce à une batterie au Lithium de 16 kWh,
- si le conducteur désire poursuivre son trajet au-delà de la décharge maximale de la batterie, il n'est pas limité comme il le serait avec un véhicule électrique et peut poursuivre en revenant en mode *charge sustaining* grâce à l'action du moteur thermique.

Cette fonctionnalité va permettre d'effectuer un transfert de consommation depuis un hydrocarbure vers d'autres sources d'énergies primaires *via* le vecteur électricité. Des sources d'énergie renouvelables, ou très faiblement émettrices de GES, pourront être utilisées afin de diminuer l'impact global du véhicule qui devra alors être évalué dans une approche prenant en compte l'ensemble de ses filières énergétiques (approche dite du puits à la roue ou *well to wheel*).

Du fait du dimensionnement de la batterie, le surcoût induit par les solutions autonomie et recharge réseau sera très important, dans une fourchette estimée, avec les données actuelles, entre 5 000 et 20 000 €.

Échange d'énergie avec le réseau

Cette fonctionnalité est déduite de la précédente mais dans ce cas le système sera capable de fournir de l'énergie compatible avec celle du réseau de distribution, soit :

- sur le réseau domestique d'une habitation afin de compléter une production à partir d'énergie renouvelable

L'électrification du transport routier

difficilement contrôlable (éolien, solaire), de pallier une panne du réseau ou d'optimiser les coûts (concept dit *vehicle to house* ou V2H),

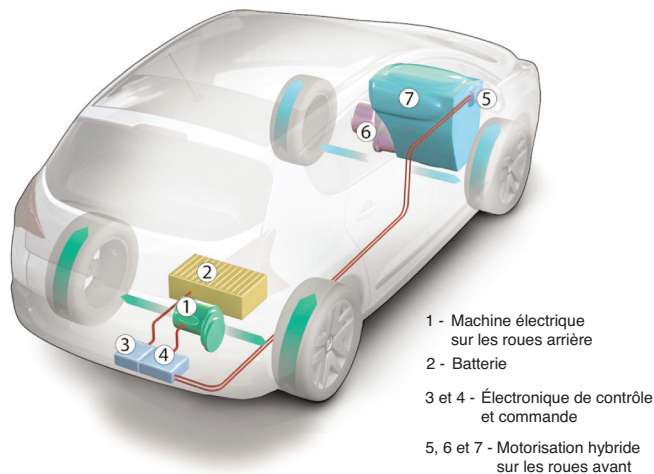
- sur le réseau de distribution, dans un but de faciliter la régulation des opérateurs, notamment par rapport à la fourniture des pointes de consommation, ou d'optimiser les coûts (concept dit *vehicle to grid* ou V2G),
- sur le véhicule lui-même, à partir de prises 110 ou 220 V alternatif permettant d'alimenter des auxiliaires de confort ou de travail.

Les approches V2H et V2G vont nécessiter la mise en œuvre de réseaux électriques bidirectionnels capables de gérer les sécurités, le fonctionnement et la tarification dans tous ces cas, ce qui pourra nécessiter des investissements importants (notion de *smart grid*).

Motorisation répartie

La mise en œuvre de machines électriques dans la motorisation permet d'envisager des architectures innovantes, comme la motorisation des roues arrière dans un véhicule à traction avant hybride. Une telle configuration a été notamment réalisée par PSA dans son « concept car » *Prologue HYmotion4* dévoilé à l'automne 2008 (figure 5).

Fig. 5 - Concept Car PSA Prologue HYmotion4 (d'après PSA)



La mise en action quasi instantanée de la machine électrique arrière permet de disposer d'un véhicule 4x4 uniquement lorsque cela est nécessaire. C'est-à-dire pouvoir augmenter les prestations de sécurité et d'agrément de conduite, tout en favorisant une réduction de la consommation énergétique par une optimisation de la récupération au freinage sur les quatre roues.

Architectures des motorisations

La mise en œuvre des fonctionnalités présentées va nécessiter l'introduction de machines électriques de puissance qui pourront être couplées de différentes manières à la motorisation, soit :

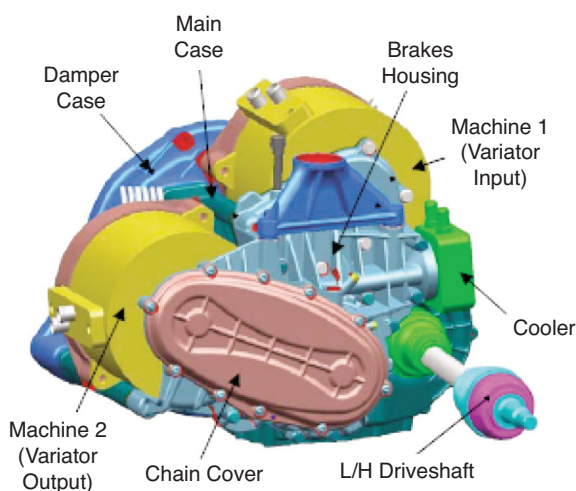
- couplage série, proche d'une motorisation électrique avec un moteur thermique qui n'est pas lié aux roues motrices mais alimente un générateur électrique. Cette solution présente l'avantage de pouvoir déconnecter totalement le moteur thermique de la dynamique du véhicule, de disposer des performances complètes en mode électrique et d'être simple à contrôler. Ce couplage nécessite par contre deux machines électriques de puissance et présente un rendement faible dans la liaison du moteur thermique aux roues. Le couplage série a été beaucoup étudié dans les années 1990 pour des véhicules particuliers en Europe, en combinaison avec des turbines à gaz notamment (PSA, Renault, Volvo), il reste utilisé dans les autobus, car il autorise une grande souplesse d'architecture (plancher bas intégral). Ce couplage est récemment revenu sur le devant de la scène avec le projet Volt de GM qui annonce un véhicule avec une autonomie tout électrique de l'ordre 60 km et une recharge réseau pour fin 2010. On notera que le couplage série peut être considéré comme favorisant une transition vers une disparition du moteur thermique avec son remplacement par un autre générateur, comme une pile à combustible, ou par un stockage dans une architecture tout électrique (voir ci après),
- couplage parallèle, celui-ci est proche d'une motorisation conventionnelle dans laquelle une machine électrique est reliée mécaniquement à la transmission. Cette configuration présente un grand nombre de variantes possibles quant à la position de la machine (intégrée ou non) et à sa liaison à la transmission (avant ou après la boîte de vitesses, sur le moteur thermique, etc.). Le couplage parallèle ne nécessite qu'une seule machine électrique dont la puissance peut être variable suivant les fonctionnalités et conserve un bon rendement dans l'utilisation du moteur thermique. Par contre ses performances en mode électrique seront plus limitées et son pilotage plus complexe, pour ce qui concerne notamment la gestion des couples et vitesses instantanés ainsi que l'embrayage. Cette architecture a été retenue notamment par Honda pour son système IMA commercialisé sur les Insight, Accord et Civic, elle est également étudiée par VW sur sa Golf hybride. On notera que d'autres types de couplage parallèle peuvent être réalisés en utilisant des machines électriques sur les

L'électrification du transport routier

roues non motrices d'un véhicule conventionnel, le couplage est alors assuré par la route (*through the road hybrid*). Cette configuration a été retenue par PSA sur le prototype *Prologue*, avec une machine centrale sur l'essieu arrière (voir ci-dessus) et Citroën avec le *C-Métisse* qui utilise deux machines dans les roues arrière,

- couplage série-parallèle ou dérivation de puissance, celui-ci a été mis au point dans le but de maximiser les gains en combinant les avantages des deux configurations possibles. Toyota a choisi cette configuration pour son hybride Prius qui comporte deux machines électriques liées par un train planétaire au moteur thermique et à la transmission. Le constructeur Renault a également travaillé sur ce concept en utilisant deux machines électriques et deux trains planétaires afin d'en optimiser les performances (voir fig 6). Un groupement de constructeurs américains et européens (GM, Chrysler, Mercedes-Benz et BMW) travaille également sur la mise au point d'une boîte de vitesse série-parallèle (figure 7),

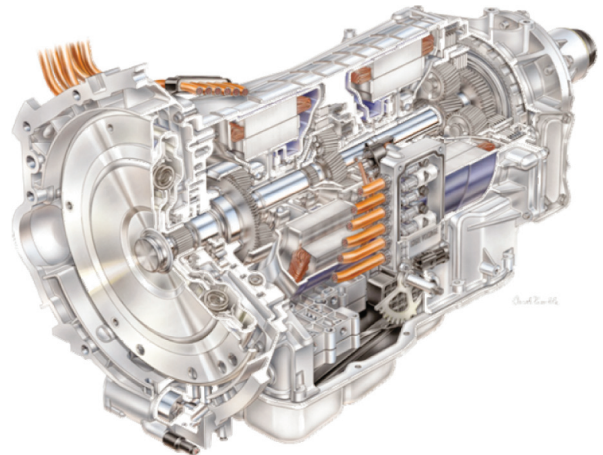
Fig. 6 - Motorisation série-parallèle Renault E-IVT⁴



- architecture tout électrique, il s'agit de l'étape ultime de l'électrification de la motorisation avec un véhicule tout électrique qui comprendrait une, ou plusieurs, machines électriques de traction et un stockage d'énergie électrique embarqué. Celui-ci pourrait être de type fermé comme une batterie ou un couplage batterie-supercondensateur (ou volant d'inertie) ou pour le futur, de type ouvert comme un générateur zinc-air ou aluminium-air, pouvant être rechargé en plaques de métal. Les véhicules électriques ont déjà connu des tentatives d'industrialisation dans le passé,

(4) Dual mode electric infinitely variable transmission : A. Villeneuve, Renault - Doc. Renault.

Fig. 7 - Boîte de vitesse hybride série-parallèle (document GM)



notamment en France et aux États-unis, qui n'ont pas eu de suite. Cependant, les progrès réalisés, tant dans l'électrochimie et la gestion des batteries, que dans l'électrotechnique pour les machines ou dans la communication et les services, ont conduit les industriels à proposer de nouveaux produits. Ces véhicules électriques de dernière génération disposent d'une autonomie de 100 à 200 km et pourront se substituer pour une part non négligeable aux véhicules conventionnels, notamment pour les usages périurbains et urbains. L'utilisation des technologies de moteurs roues permet d'envisager par ailleurs une refonte de l'architecture des véhicules, à l'exemple du concept Heuliez-Michelin sur la Will. Plusieurs constructeurs tels Renault-Nissan, Mitsubishi ainsi que des fabricants chinois ont ainsi annoncé des mises sur le marché de véhicules électriques entre 2010 et 2012. Les prix de ces véhicules équipés de 20 à 30 kWh de batteries au Lithium sont encore très élevés avec des surcoûts de l'ordre de 10 000 à 20 000 €, mais des progrès sont attendus avec la production en grande série. Par ailleurs, la diffusion des véhicules électriques nécessite la mise en œuvre d'une infrastructure de recharge et donc une collaboration étroite entre les constructeurs, les fournisseurs d'énergie et les autorités locales et gouvernementales. Une telle situation est tout à fait illustrée dans les accords de partenariats récemment passés par l'alliance Renault-Nissan dans différents pays comme Israël, le Danemark, le Portugal, ou avec des autorités locales comme en Californie ou au Japon.

Problématique et perspectives

L'électrification des véhicules est appelée à jouer un rôle clef dans l'optimisation des véhicules futurs, avec

L'électrification du transport routier

l'intérêt, comme nous l'avons vu, de pouvoir être implémentée à des niveaux plus ou moins poussés, ce qui permet d'imaginer une progressivité dans sa mise en place et donc de faciliter l'adaptation des outils industriels.

Cette évolution permettra de réduire la consommation des véhicules à des niveaux dépendants du degré de complexité retenu et de l'usage du véhicule, mais elle permettra également d'implémenter des fonctionnalités nouvelles comme l'autonomie tout électrique ou la recharge réseau. Pour ces derniers cas, le vecteur électricité sera un moyen de réduire les émissions de gaz à effet de serre, la dépendance aux hydrocarbures et les nuisances locales.

Les constructeurs ont déjà développé, et pour certains commercialisé, différents concepts de motorisation hybride ou électrique. Il apparaît cependant que leur diffusion massive dans le parc, qui est nécessaire notamment pour avoir un impact sur l'effet de serre, implique qu'un certain nombre de points soient validés. On peut citer :

- le stockage d'énergie, notamment la gestion et la sécurité des packs de batterie au lithium dimensionnés pour des véhicules, le packaging, les conditions de vieillissement, les coûts, les nouveaux matériaux. Par ailleurs, la standardisation des tests ou des caractéristiques principales selon les applications (hybride, hybride rechargeable, électrique, véhicules particuliers, utilitaires, flottes, etc.) ainsi que les conditions d'industrialisation devront être abordées,
- la motorisation électrique et les auxiliaires, notamment la réduction du volume et du coût, l'amélioration des performances en usage et de la fiabilité ainsi qu'une meilleure intégration,
- l'infrastructure de recharge, notamment l'accessibilité, la sécurité, la communication, la facturation, le coût,
- les méthodologies d'analyse du cycle de vie. Celles-ci sont nécessaires afin de mettre en évidence l'empreinte réelle du véhicule et de ses composants entre leur construction et leur recyclage ainsi que les

problèmes de disponibilité éventuelle de matériaux. Par ailleurs l'analyse des filières énergétiques utilisées est nécessaire afin de mettre en évidence l'impact réel de l'utilisation d'un véhicule, notamment en gaz à effet de serre (approche du puits à la roue),

- la sensibilité des gains obtenus en consommation aux conditions d'usage du véhicule et aux technologies de motorisation (essence, diesel) qui nécessiteront un choix judicieux pour les différents types d'application.

De nombreux programmes de recherche sont développés en Europe, en Amérique du Nord et en Asie afin de progresser sur ces différents points. Parallèlement, de nombreux constructeurs prévoient une mise sur le marché de modèles dès 2010-2012, après validation en flottes de tests. Pour les véhicules hybrides, toutes technologies confondues, les perspectives de marché mondial font apparaître des ventes variant de 3,5 à 8 millions d'unités dès 2015, soit plus de 10 % des ventes dans l'hypothèse haute.

Dans un contexte économique difficile, une telle évolution nécessite la mise en place de nombreuses collaborations entre les partenaires, que l'on constate déjà entre constructeurs et fournisseurs de systèmes de stockage ainsi qu'entre constructeurs et fournisseurs d'énergie électrique. Parallèlement, les collaborations avec les autorités locales et nationales devront être renforcées afin de progresser sur les aspects normatifs, incitatifs et les infrastructures énergétiques.

La volonté des différents intervenants ainsi que les évolutions que l'on constate permettent de penser que l'électrification des véhicules pourrait être un atout pour les industriels du secteur dans le contexte économique et environnemental difficile que nous vivons. Le niveau d'électrification des véhicules diffusés dépendra alors des succès obtenus dans la maîtrise du stockage d'énergie, des coûts et de l'industrialisation.

*François Badin - francois.badin@ifp.fr
Manuscrit remis en janvier 2009*