

# Les Rencontres Scientifiques Colas

« L'avenir du véhicule électrique »

2 juin 2009

avec **Yves CHABRE**

Docteur ès-Sciences

*Consultant pour véhicules électriques*

et **Pierre MIDROUILLET**

*Directeur Général de PVI*

*(Constructeur de véhicules industriels électriques)*

Conférence modérée par **Mathieu NOWAK**

Journaliste à *La Recherche*

---

**Symbole de liberté et de progrès, la voiture est aujourd'hui décriée en raison des nuisances qui lui sont associées, en particulier la pollution.**

**La propulsion électrique est-elle la solution d'avenir ? Quels sont les freins au développement de la voiture électrique individuelle ?**

**Voici quelques questions clefs qui seront abordées.**

## Intervention de Monsieur Pierre MIDROUILLET

Les chaînes cinématiques électriques ont équipé les véhicules très tôt dans l'histoire de l'automobile. Dès l'avènement du pétrole au début du XX<sup>ème</sup> siècle, les véhicules électriques ont quasiment disparu au profit des véhicules à essence ou à gazole.

Le problème du véhicule électrique ne réside pas dans sa chaîne de traction car, en termes de rendement de volume ou de masse, les performances sont bien meilleures que celles d'un moteur thermique.

En effet, le rendement d'un bon moteur thermique sur route se situe à environ **38%** et descend à moins de **20%** en circulation urbaine dense, alors qu'il se situe autour de **90%** pour une cinématique électrique.

Malheureusement, l'énergie électrique se stocke difficilement et la « fonction » stockage d'énergie, pratiquement gratuite sur un véhicule thermique, est hors de prix sur un véhicule électrique. Exemple : stocker 45 kw/h d'énergie sur un véhicule est l'équivalent de 3 bouteilles d'eau de 1,5 l sur un véhicule thermique et environ **30.000 €** et **400 kilogrammes** sur un véhicule électrique.

Néanmoins, la raréfaction des carburants fossiles et la prise de conscience des problématiques liées à la pollution atmosphérique et sonore amènent à trouver des solutions.

Pour trouver ces solutions, il faut se poser la question du « profil de mission ».

Nous pouvons distinguer 3 natures de profil :

- ✓ maîtrisé totalement (ex. autobus)
- ✓ maîtrisé partiellement (ex. livraison)
- ✓ non maîtrisé (ex. transport grande distance)

Seuls les profils maîtrisés totalement, et éventuellement quelques profils maîtrisés partiellement, sont accessibles au véhicule électrique.

Pour les profils non maîtrisés, ou peu maîtrisés, d'autres solutions s'imposent (hybride.....).

Enfin, la maîtrise des comportements permettrait de diminuer la consommation et diminuer la taille de la batterie.

La chaîne cinématique électrique, outre son bon rendement, permet la récupération de l'énergie cinétique du véhicule ; on cherchera donc à optimiser et à minimiser la consommation des véhicules afin de limiter la batterie, en limitant la vitesse et les accélérations et en « encadrant » le conducteur afin de l'aider à économiser.

Le véhicule électrique est déjà une réalité (la ligne 64, à Paris, utilise depuis près de dix ans, des autobus électriques sur le circuit très accidenté de Montmartre).

Son utilisation est amenée à se répandre du fait de l'inéluctable augmentation du coût de l'énergie fossile.

Elle restera toutefois limitée à la ville et à sa proche banlieue du fait de la problématique des batteries.

Néanmoins, les propriétés inhérentes à ces véhicules telles que la récupération d'énergie au freinage permettront de voir émerger une nouvelle génération de véhicules « hybridés », associant moteurs

thermiques et électriques, avec des techniques de recharge rapide à l'aide de « super-condensateurs » ou d'échanges de packs plus ou moins automatisés.

## **Intervention de Monsieur Yves CHABRE**

Il est unanimement reconnu que le développement du véhicule électrique est principalement dépendant des progrès des batteries de traction, au niveau de l'autonomie qu'elles peuvent fournir au véhicule avec la puissance requise pour l'application visée, ce avec un très haut degré de sécurité et une grande fiabilité, le tout à un prix acceptable par le marché.

Les batteries Plomb-acide, qui sont encore très employées dans l'application traction lorsque l'autonomie du véhicule et le poids de la batterie ne sont pas des critères limitants - ainsi dans la manutention en sites industriels -, ont des densités d'énergie massique de l'ordre de 30 Wh/kg et des durées de vie qui plafonnent vers 300-500 cycles. Les batteries alcalines Nickel-Cadmium qui sont également employées dans ces applications ont des densités d'énergie à peu près doubles, avec des durées de vie qui dépassent le millier de cycles.

Si on regarde le besoin énergétique d'une voiture personnelle, il se situe dans la plage des 100 à 200 Wh/km, selon qu'il s'agit d'une petite urbaine à vitesse maximum de l'ordre de 100 km/h ou d'une 4-5 places de tourisme pouvant monter aux 130 km/h. On voit donc la limite des possibilités offertes par la batterie Ni-Cd, avec laquelle on avait, dans les années 90, une autonomie de l'ordre de la centaine de km sur une Peugeot 106 ou une Citroën Saxo, deux véhicules qui ont été produits à plusieurs milliers d'unités dans cette décennie.

Les batteries Lithium-ion, apparues au début des années 90, offraient alors des densités d'énergie de l'ordre de 120 Wh/kg, tandis que pour les batteries alcalines Nickel-Métal Hydrures (Ni-MH) – les « descendantes » des Ni-Cd, apparues aussi à la même période – on se situe autour des 70 Wh/kg. Les batteries Li-ion ont donc de ce fait très rapidement dominé complètement le marché des applications nomades - téléphones mobiles et ordinateurs – et on a pensé qu'au tournant du millénaire on disposerait de batteries permettant des autonomies de véhicules frisant et même dépassant les 200 km.

Mais la forte densité d'énergie des batteries Li-ion tient principalement à la très grande électropositivité du lithium – c'est-à-dire à son fort pouvoir de réduction ; ce qui fait que, dans une cellule électrochimique, mis par exemple en face de certains oxydes de métaux de transition, on atteint une tension de cellule de l'ordre de 4V, celle des batteries alcalines étant 3 fois plus faible – 1,2 à 1,4V. Cette forte activité va de pair avec une possible dégradation des matériaux mis en jeu - matériaux d'électrode et électrolytes -, avec risque de réactions secondaires exothermiques, qui posent de gros problèmes de sécurité lorsque les batteries sont de grande taille.

Il a fallu donc, d'une part, rechercher des matériaux plus stables et, d'autre part, développer des électroniques de contrôle très fiables ; dans une batterie Li-ion, chaque cellule - et il y en a plus d'une centaine en série dans une batterie de voiture de tourisme - est contrôlée en permanence en potentiel avec action sur chacune d'elles pour les équilibrer et sur la batterie dès que l'on sort d'une certaine fenêtre de valeurs en tension et/ou courant.

On dispose maintenant pour l'application « véhicules électriques » d'une assez large palette de batteries Li-ion, avec des électrodes positives de type oxyde de Ni-Co-Mn – ou de Mn seul ( $\text{LiMn}_2\text{O}_4$ ) et surtout un phosphate de fer lithié ( $\text{LiFePO}_4$ , mis au point à la fin des années 90), ce dernier offrant un très haut degré de sécurité intrinsèque (meilleure stabilité structurale dans l'état chargé de la batterie). Avec du graphite comme électrode négative (c'est le matériau actuellement le plus employé), les énergies massiques vont respectivement d'environ 140 à 100 Wh/kg pour un système complet.

L'autre caractéristique importante pour l'application véhicule électrique est la puissance que peut fournir la batterie. Dans une même technologie – un même couple électrochimique - on peut faire varier la puissance spécifique en jouant sur la morphologie des matériaux actifs, l'épaisseur des électrodes et des collecteurs de courants, etc. Mais un gain en puissance spécifique (W/kg) se fera toujours au détriment de l'énergie spécifique et inversement.

Se pose aussi la question de l'aptitude de la batterie à une recharge rapide, autant pour accepter les instants de recharge venant du freinage électrique avec récupération d'énergie (qui permet de récupérer 10 à 15% d'énergie, et donc d'augmenter l'autonomie d'autant) que pour des applications où on veut une disponibilité maximum du véhicule, alors que les régimes de recharge standards correspondent à des temps de charge de 4 à 6 heures pour une charge complète. On commence à trouver des batteries permettant ces régimes de charge rapide (80% de la capacité nominale en 5 minutes). Elles sont basées sur l'utilisation à l'électrode négative d'un composé - le titanate de lithium  $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$  - insérant le lithium à un potentiel plus élevé que le graphite, ce qui permet de fortes surtensions de charge sans risque d'atteindre le dépôt de lithium métallique. Mais là encore il y a gain de rapidité de charge au détriment de la densité d'énergie, du fait de la moindre différence de potentiel entre les deux électrodes positive et négative. On revient ainsi autour de 50-60 Wh/kg pour un système complet, mais avec des durées de vie de plus de 5 000 cycles pour certains systèmes.

La jonction est ainsi faite actuellement entre le domaine des batteries et celui des supercondensateurs, qui, basés sur le principe d'un stockage d'énergie sous forme d'un champ électrique dans une double couche électrochimique, permettent des densités de puissance dépassant les 10 kW/kg ; ce, avec des densités d'énergie atteignant les 10 à 20 kWh/kg pour la dernière génération dite hybride, car associant une électrode fonctionnant sur le principe de la double couche électrochimique et une électrode se rapprochant d'une électrode à insertion.

Si on ajoute à ces batteries Li-ion les batteries lithium métal-polymère (initiées par Hydro-Québec, maintenant développées par Batscap et annoncées pour 2010), on voit que l'on dispose actuellement d'un large choix de systèmes permettant d'offrir une solution optimisée pour chaque application.

Reste la question du coût par rapport à ce que peut accepter le marché et celle de la disponibilité des matériaux de base, et donc, corrélativement, la question du recyclage.

Actuellement le prix d'un pack-batterie pour véhicule électrique se situe dans la plage des 500 à 700 €/kWh, BMS comprise. Prix qui devrait baisser sensiblement une fois que la production de série aura vraiment démarré. Il semble que l'on puisse tabler sur un prix autour de 350 €/kWh à l'horizon 2014-2015.

Pour ce qui est des ressources, la question se pose en des termes très différents selon le type de batterie c'est-à-dire selon que le matériau d'électrode positive contient des proportions notables de cobalt et de nickel ou selon qu'il s'agit de phosphate de fer. Cobalt et nickel, qui sont les éléments valorisants, sont récupérés dans les procédés haute température actuellement opérationnels tandis que le lithium ne l'est pas. Dans les batteries au phosphate de fer lithié, il n'y a pas de valorisation à la récupération, si ce n'est les métaux des collecteurs de courant (Cu et Al) et le lithium. Cela implique des procédés de mise en solution suivis de traitements électrochimiques qui existent actuellement au stade de pilotes. Mais ce recyclage aura un coût.

Au final, il me paraît certain que le véhicule électrique, qui ne répondra jamais à toutes les applications, mais qui répond très bien à des usages spécifiques, devrait représenter avant 2020 la grande majorité des véhicules de service en zone urbaine – même étendue - ainsi qu'une large proportion des véhicules personnels dans ces mêmes zones.

Il est également certain que l'hybride rechargeable (« plug-in hybrid ») à groupe de propulsion électrique, permettant une autonomie d'une cinquantaine de kilomètres en mode batterie, et sans limite avec recharge « en ligne » par groupe électrogène embarqué, est une solution bien adaptée à la densité du tissu urbain dans notre pays, permettant en semaine une « commutation » en mode principalement électrique, sans limitation d'autonomie si besoin.



La **Recherche**  
L'ACTUALITÉ DES SCIENCES