

Texte de la 276^e conférence de l'Université de tous les savoirs donnée le 2 octobre 2000.

VEHICULE ET BATEAU ELECTRIQUES : VERS UN RENOUVEAU DURABLE ?

Par Jean-Louis AUCOUTURIER

Le développement des véhicules électriques a connu depuis 1870 des fortunes diverses. Pour les véhicules évoluant en site propre ou partagé et qui peuvent, de ce fait, recevoir en permanence une alimentation en énergie électrique par caténaies ou captation au sol, c'est l'électricité qui l'a emporté sur la vapeur et sur le moteur à combustion interne.

Les véhicules automobiles autonomes ont connu pendant ces cent trente années une évolution cyclique. En reprenant les termes de l'excellent ouvrage de synthèse de Roland Wolf, *Le véhicule électrique gagne le cœur de la ville*, on peut distinguer : la genèse (1870 à 1900), l'âge d'or des années 1900, le recul de l'entre-deux guerres, les ersatz de 1940-45, les années difficiles, le faux départ des années 1970, la veille technologique des années 1980 enfin.

En 2000, cent ans après le premier âge d'or, les données ont changé. Les techniques ont évolué et de multiples solutions électriques sont proposées. Leur mise en œuvre ne suffira cependant pas pour assurer un développement significatif du véhicule électrique. Il convient maintenant d'aborder le problème dans son ensemble et de prendre en compte les données sociologiques et économiques liées à la mobilité.

Si dans ce contexte un nouvel âge d'or s'ouvre pour le véhicule électrique, ce renouveau sera-t-il durable ?

LA SITUATION A LA FIN DU XIX^E SIECLE

Sans prétendre faire une présentation historique exhaustive, il est instructif de comparer la situation du véhicule électrique à cent ans d'intervalle. On peut considérer que l'acte de naissance du premier véhicule électrique construit en France figure au journal officiel du 20 avril 1881 : « l'ingénieur Trouvé a équipé un tricycle à pédales, Coventry Rotary de 55 kg, de deux petits moteurs électriques. Accumulateurs à l'arrière, poids total 160 kg, il a parcouru hier plusieurs fois la rue de Valois à 10 ou à 12 kilomètres à l'heure. » Le même ingénieur, Gustave Trouvé, présente la même année un bateau électrique sur le lac du bois de Boulogne et sur la Seine.

En 1881, Raffard construit le premier véhicule électrique à quatre roues. En 1895, Jeantaud engage une voiture électrique à la course Paris – Bordeaux et termine l'épreuve dans les délais impartis, ses batteries chargées étaient transportées par le train pour leur permutation aux relais des étapes. L'histoire a surtout retenu le record de vitesse de Jenatzy qui, sur la *Jamais contente*, atteint 105 km/h le 1^{er} mai 1899 à Archères.

Mais c'est en ville que s'est développée naturellement la voiture électrique. Le concours des voitures de place de 1898, organisé par l'Automobile Club de France eut un grand retentissement. Onze voitures électriques, ou électromobiles, et une seule voiture à pétrole prirent part au concours où Jeantaud et Krieger se partagèrent les prix. Krieger fut le pionnier le plus tenace puisqu'il lutta pendant trente ans pour promouvoir la voiture électrique.

À Aubervilliers, la Compagnie Générale des voitures à Paris ouvre en 1898 un parcours école pour les conducteurs de fiacres électriques. Des flottes de taxis et autobus électriques circulent vers 1910 à Berlin, Londres et Paris. Aux États-Unis, la voiture électrique connaît un grand succès. En 1914, Milburn Wagon Company produit une voiture électrique dont sept mille exemplaires seront vendus.

LA SITUATION ACTUELLE

Un siècle s'est écoulé et après quelques rebondissements induits par les difficultés en approvisionnement en produits pétroliers, c'est essentiellement pendant les années 1990 qu'un regain d'intérêt est apparu. Plusieurs facteurs sont à l'origine de cette récente évolution :

- l'arrivée à la phase d'industrialisation des travaux de recherche et de développement des batteries d'accumulateurs ;
- l'amélioration des moteurs et particulièrement de leur électronique de commande ;
- la prise de conscience de la détérioration de la qualité de vie en centre ville et des risques encourus pour la santé en raison de la pollution atmosphérique mais aussi des nuisances sonores ;
- la réflexion sur les ressources en énergies fossiles et les risques que leur surconsommation induit pour l'équilibre de la planète ;
- la réflexion d'un nombre encore bien trop faible d'usagers sur la finalité de l'automobile, incomparable moyen de mobilité et de liberté, devenu signe de réussite sociale, mais dont les excès en font aussi un incomparable moyen de destruction.

Aujourd'hui, 15 000 véhicules électriques ont été immatriculés en Europe de 1995 à 2000, dont 6 000 en France. Des expériences en grandeur réelle ont eu lieu pour des particuliers sur des sites tels que La Rochelle, Mendrisio et Zermatt en Suisse. Des flottes ont été constituées au sein d'organismes et de collectivités locales tels que EDF (1 100 véhicules), La Poste (500), La Rochelle (200), Bordeaux (130), Paris (120), Lyon (100). Des projets et des services de véhicules en usage partagé ont vu le jour : Liselec (50 véhicules), Praxitèle (30), et le concept Tulip (5).

LE VEHICULE TOUT ELECTRIQUE

Pour juger de la démesure en consommation d'énergie à laquelle a conduit l'automobile, il est bon de rappeler quelques grandeurs fondamentales.

Un homme circulant à vélo pendant une heure à 36 km/h (vitesse moyenne d'une automobile en ville) consomme 0,8 kWh. Pour une telle utilisation, une voiture thermique consomme environ 3 kg de carburant soit 30 kWh ; alors qu'une voiture électrique consomme 5 kWh. Ce rapport de 1 à 6 d'énergie consommée vient du rendement de la chaîne de traction qui est de l'ordre de 20 % pour le thermique alors qu'il est supérieur à 80 % pour l'électrique et aussi de la particularité du moteur électrique qui a une consommation nulle lorsque le véhicule est à l'arrêt alors que le moteur thermique continue à consommer. Pour une telle utilisation, le bilan est donc nettement en faveur de la voiture électrique.

En revanche, si l'on considère la masse transportée correspondant au stockage de l'énergie embarquée, elle est pour la voiture thermique d'environ 50 kg pour un réservoir de carburant, dont seulement 3 kg seront prélevés pour accomplir la mission. Pour les voitures électriques du type de celles choisies pour cet exemple, la masse des batteries nickel cadmium est de 250 kg, dont la moitié de la charge sera utilisée pour la mission. Le rapport des masses embarquées pour stocker l'énergie est donc de 1 à 5 en faveur de la voiture thermique.

On touche là le véritable problème du véhicule tout électrique qui doit embarquer la totalité de l'énergie dans des batteries d'accumulateurs. Le progrès pour ce type de véhicule est donc directement dépendant des progrès des batteries.

Évolution des batteries pour la traction électrique

Depuis l'accumulateur de Planté (1852), de très nombreux couples électrochimiques ont été étudiés. Les batteries dédiées à la traction électrique et qui sont en production

industrielle ou en l'état de prototypes prochainement industrialisables, sont les batteries au plomb, au nickel/cadmium, au nickel/hydrures métalliques et au lithium/ion.

Les caractéristiques d'un système de batteries d'un volume maximal de 200 litres, compatible avec son installation à bord d'un véhicule urbain, pesant 800 kg sans les batteries, sont présentées au tableau ci-dessous. On voit que l'autonomie du véhicule peut tripler grâce à l'évolution des batteries.

	Plomb	Ni-Cd	Ni-MH	Li-ion
Énergie (kWh)	11	12	18	28
Masse (kg)	458	246	303	245
Cycles	600	2 000	1 500	1 000
Autonomie (km)	67	87	118	200
Prix (kF)	12	25	39	28
<i>Prix(F/km) (1)</i>	<i>0,34</i>	<i>0,14</i>	<i>0,22</i>	<i>0,17</i>
En production	Oui	Oui	2001	2004

(1) prenant en compte une durée de vie exprimée en nombre de cycles de charge-décharge et le coût de l'environnement de la batterie.

Charge des batteries

Le véhicule routier électrique souffre de deux handicaps qui se cumulent. La masse des batteries embarquées en limite l'autonomie et de plus le temps nécessaire à leur charge est bien supérieur au temps d'utilisation. Si la pleine charge permet d'assurer la mission quotidienne du véhicule, la charge pendant la nuit sur une simple prise de courant (220V-16 A) résout le problème.

L'expérience conduite à La Rochelle pendant un an sur cinquante véhicules Peugeot 106 et Citroën AX a montré que 93 % des utilisateurs chargent la nuit au domicile, 4 % utilisent des bornes normales installées en ville, 2 % chargent sur des prises normales à l'occasion de visites, et 1 % utilise des bornes de charge rapide.

Permutation des batteries

Certains véhicules routiers ont des missions bien définies qui nécessitent un passage à leur dépôt plusieurs fois par jour, c'est le cas des bennes de collecte d'ordures ménagères, des autobus, des véhicules de livraison. Le plein d'énergie peut alors se faire en échangeant les batteries déchargées contre des batteries rechargées. Cette opération, dite de permutation, peut être rapide et automatisée.

Les deux roues, scooters ou vélos se prêtent très bien à la permutation des batteries car leur poids est tel qu'elles peuvent être manipulées par une personne.

Les sources d'énergie d'appoint

Le dimensionnement de la batterie doit prendre en compte les divers régimes de fonctionnement du véhicule. Lors du démarrage, l'appel de courant est très important et peut atteindre cinq à six fois le courant nécessaire pour entraîner le véhicule à vitesse constante. Il peut, dans ces conditions, être intéressant d'associer à la batterie un élément de stockage de l'énergie capable de la restituer en un temps court à un niveau de puissance élevé. Cet élément est ensuite rechargé pendant un temps plus long par l'énergie prélevée sur la batterie principale et par l'énergie récupérée au freinage. Ces éléments peuvent être des supercondensateurs ou des accumulateurs cinétiques d'énergie.

Un supercondensateur est un élément qui stocke l'énergie électrostatique en polarisant une solution électrolytique. Dans ce mécanisme de stockage, il n'y a pas de réaction chimique. Ce mécanisme est totalement réversible et permet des dizaines de milliers de cycles de charge et de décharge.

Un accumulateur cinétique d'énergie fonctionne sur le principe d'un volant d'inertie couplé à un moteur électrique. Dans la phase de montée en vitesse du volant, le moteur électrique entraîne le volant d'inertie, en régime permanent il compense les pertes par frottement et maintient le volant à vitesse constante. La restitution de l'énergie cinétique emmagasinée se fait à travers le même moteur qui fonctionne alors en générateur électrique. Pour un volant de masse et de diamètre donnés, l'énergie cinétique est proportionnelle au carré de la vitesse de rotation du volant, l'intérêt est donc de travailler à grande vitesse. Des progrès substantiels ont été réalisés en utilisant des matériaux composites pour le volant, en remplaçant les roulements en acier par des roulements en céramique, puis par des paliers magnétiques, enfin en plaçant toutes les pièces tournantes dans une enceinte sous vide.

LE VEHICULE HYBRIDE

Des solutions au problème de l'autonomie ont été recherchées en produisant à bord du véhicule une partie ou même la totalité de l'énergie mécanique ou électrique qui lui est nécessaire. Ce type de véhicule est dit hybride, au sens étymologique du terme, puisqu'il marie deux sources d'énergie d'origine différente. On distingue la propulsion hybride série et la propulsion hybride parallèle.

Une chaîne cinématique est dite *série* lorsque seul le moteur électrique est couplé aux roues motrices et que son énergie lui est fournie par les batteries et/ou un générateur actionné par un moteur à combustion interne.

Une chaîne cinématique est dite *parallèle* lorsque les roues motrices reçoivent l'énergie mécanique du moteur électrique et/ou du moteur à combustion interne par l'intermédiaire d'un coupleur. Les véhicules hybrides les plus courants utilisent d'une part l'énergie stockée dans des batteries et d'autre part l'énergie produite à bord par un générateur électrique mû par un moteur à combustion interne. On pourra aussi considérer comme hybride un véhicule qui associe des batteries à une pile à combustible ou à des capteurs solaires.

Les véhicules hybrides thermique-électrique

Les véhicules à dominante électrique ont des batteries de capacité importante, chargées sur le réseau et ont un groupe électrogène d'appoint, de faible puissance qui peut apporter un complément de charge aux batteries et qui agit alors en « prolongateur » d'autonomie. Ce sont des hybrides série.

D'autres véhicules sont à dominante thermique. Leurs batteries sont de faible capacité, ce sont plutôt des batteries de puissance que d'énergie. Leur moteur thermique a une puissance suffisante pour assurer la propulsion du véhicule sur autoroute et aussi pour charger les batteries. Ce sont des hybrides parallèles qui fonctionnent en électrique en cycle urbain et en thermique à grande vitesse. Un fonctionnement mixte peut exister pour apporter un supplément de puissance.

Les véhicules à piles à combustible

Le principe de l'électrolyse inversée, énoncé en 1802, met en évidence la possibilité de produire de l'électricité à partir de la réaction chimique entre l'oxygène et l'hydrogène. Partant de ce procédé, Grove expérimente en 1839 la première pile à combustible produisant de l'électricité et de l'eau. Contrairement aux autres piles où le combustible est stocké dans le

générateur, une pile à combustible fonctionne avec l'oxygène de l'air et reçoit l'hydrogène d'un réservoir extérieur. L'autonomie d'un véhicule électrique à pile à combustible ne dépend dans ces conditions que de son approvisionnement en hydrogène.

L'hydrogène peut être stocké à bord du véhicule sous une pression de 300 bars ou sous forme liquide. Il peut aussi être produit à bord à partir de méthanol par exemple.

Les piles à combustible dites à basse température (80°C) et utilisées pour le véhicule électrique sont soit des piles alcalines soit des piles à membrane polymère.

Les voitures à capteurs solaires

Le faible rendement des capteurs solaires et la surface disponible sur une voiture ne permettent pas de retenir cette solution d'autant plus que même dans de très bonnes conditions d'ensoleillement, les véhicules doivent emprunter des trajets où les zones d'ombre sont nombreuses. Néanmoins, les réalisations les plus marquantes sont les véhicules qui concourent au *World Solar Challenge*. Ces véhicules, allégés au maximum, disposant d'une surface maximale de capteurs solaires, traversent l'Australie, soit 3 000 km, avec la seule énergie solaire, roulant de 8 heures à 17 heures, à plus de 80 km/h de moyenne.

Moteurs électriques et électronique associée

Dans le domaine de la traction, on peut distinguer deux modes de fonctionnement. Le premier correspond à une évolution urbaine du véhicule à faible vitesse mais où un fort couple est nécessaire pour relancer le véhicule. Le second correspond à un parcours routier voire autoroutier où le moteur travaille à puissance quasi constante.

Pour répondre à ce besoin en énergie mécanique, les véhicules à moteur à combustion interne utilisent une boîte de vitesse, de manière à placer en permanence le moteur sur des points de fonctionnement favorables.

Le moteur électrique, lui, outre son bon rendement, a la propriété de pouvoir délivrer son couple maximum dès les très basses vitesses. On peut ainsi espérer couvrir la totalité de la gamme de vitesse sans changer de rapport de réduction.

Le moteur à courant continu à excitation série est très utilisé dans le domaine de la manutention.

Les chaînes de traction pour les véhicules électriques routiers ont fait appel au moteur à courant continu à excitation séparée puis, pour s'affranchir du collecteur mécanique, aux machines alternatives : synchrone à inducteur bobiné, synchrone à aimants permanents, asynchrone à induction, à réluctance variable

Ce sont les progrès de l'électronique de commande et de puissance qui ont permis la réalisation de systèmes aussi complexes, performants et fiables.

LE BATEAU ELECTRIQUE

Comme le véhicule routier, le bateau électrique a connu une évolution cyclique, on peut distinguer :

- Les pionniers de 1830 à 1900 : bien qu'il y ait eu des prédécesseurs tels que Von Jacobi et le Comte de Molin, c'est à Gustave Trouvé, que l'on attribue la réelle paternité du bateau électrique avec son bateau Euréka équipé d'un moteur électrique hors-bord de son invention présenté en 1881.

- Le déclin de l'entre deux guerres : des applications pratiques et à usage professionnel, même restreintes, virent le jour en France consécutivement à l'invention de Gustave Trouvé. Elles furent néanmoins vite supplantées par le moteur à explosion utilisant un pétrole abondant et bon marché.

- Les péniches électriques des années 1940 : leur apparition sur l'étang de Thau et sur la Seine est liée, comme pour le véhicule électrique, à la pénurie de l'essence.

- 1970 : le renouveau par les loisirs : la propulsion électrique sur l'eau et pour des fins utilitaires disparut dans les années 1950 pour réapparaître, essentiellement aux États-Unis et dans les pays anglo-saxons sous la forme de moteurs hors-bord électriques pour équiper de petites embarcations de pêche.

Les années 1990 : un réel marché émergent et des sources d'énergie diverses

Le diesel-électrique

Ce type de propulsion est très largement utilisé pour l'entraînement de la ligne d'arbres de navires de fort tonnage.

Le tout électrique

Les progrès des batteries développées pour les véhicules électriques routiers sont intéressants pour le bateau électrique mais, d'ores et déjà, on peut obtenir des autonomies tout à fait satisfaisantes avec des batteries traditionnelles Plomb ou Plomb-gel une remarque fondamentale s'impose : pratiquement dès les débuts de la plaisance à moteur, l'habitude a été prise de surmotoriser les bateaux. Or, la puissance nécessaire à l'avancement d'une coque à déplacement varie en fonction du cube de la vitesse. Il suffit alors d'être raisonnable et de fixer un point de fonctionnement optimum, par exemple aux 2/3 de la vitesse limite de la coque pour minimiser considérablement la consommation d'énergie. Ainsi, Egretta, le bateau-laboratoire du Pôle Véhicules Électriques Aquitain, consomme 12 kW pour atteindre la vitesse de 9 nœuds, mais seulement 3,5 kW à 6 nœuds

Les bateaux de pêche-promenade constituent en France une flotte de plaisance électrique évaluée à plus d'un millier d'unités, pour une dizaine de constructeurs de tailles diverses (30 dans le monde). Il s'agit, pour la plupart, de bateaux de promenade, à usage locatif, n'excédant pas 5 mètres de longueur, munis d'un moteur d'une puissance moyenne de 1kW. Les bases de location de bateaux électriques commencèrent à se développer en France il y a 10 ans et connaissent de nos jours un réel succès.

De nouvelles perspectives s'ouvrent pour les bateaux à transport collectifs de passagers : Venise fut, à la fin des années 1980, la première ville à équiper sa Compagnie de Transport, ACTV, d'un *vaporetto elettrico*, de 23 mètres de long, transportant 210 passagers à 17 km/h.

L'exemple de Strasbourg est très significatif de cette nouvelle génération de bateaux pour le transport de passagers. La ville de Nantes a mis en place en 1995 un service public de navettes sur l'Erdre. La Communauté de villes de La Rochelle a mis en service, en 1998, un passeur électrique reliant le Vieux Port au Port des Minimes. D'une longueur de 10 mètres, pour 3,50 mètres de large, le passeur électrique peut embarquer 30 passagers. Plus de 200 000 personnes ont utilisé ce passeur en 1999.

Le tourisme fluvial constitue une récente perspective, avec la définition et la réalisation de péniches habitables conçues naviguer en total respect de l'environnement et dans les conditions les plus confortables pour les utilisateurs.

Le solaire-électrique

Contrairement aux voitures, l'énergie solaire peut dans certains cas permettre une autonomie totale des bateaux. C'est le cas des bateaux à passagers qui sont en service régulier sur le lac Léman.

La pile à combustible

Son avenir peut être prometteur dans un contexte approprié ; il nécessitera des infrastructures de distribution et de stockage ou de production d'hydrogène à bord.

CONCLUSION

Les véhicules tout électrique existants et ceux qui sont annoncés pour les prochaines années répondent à la majorité des besoins de déplacement urbains et périurbains et ce d'autant mieux que beaucoup de foyers ont maintenant une deuxième, voire une troisième voiture. Leur intégration dans des flottes et dans des services en usage partagé est sans doute encore le moyen le plus efficace de prouver toutes leurs possibilités et leur intérêt.

À partir de là, le critère économique entre en ligne de compte. S'agissant de l'intérêt général, ce sont des décisions politiques au niveau de l'État et des collectivités territoriales qui doivent être prises et à un niveau qui permette de passer du bricolage à effet médiatique à la dimension nécessaire pour que l'impact soit sensible sur la qualité de vie. En France, des primes cumulées de l'Etat et de l'EDF ont été attribuées. Certaines mesures significatives ont été prises telles des aides à 50 % pour l'achat d'une voiture électrique dans la commune de Mendrisio en Suisse ou pour l'achat d'un scooter électrique à Rome.

En ce qui concerne les véhicules hybrides, à coût comparable, leur acceptation par l'utilisateur sera plus facile car leurs performances se rapprochent beaucoup de celles des véhicules thermiques actuels. Ils bénéficieront des améliorations des moteurs thermiques et les constructeurs devraient voir là un prolongement de ce qui est l'essentiel de leur activité. Enfin, tout laisse à penser que l'hydrogène sera le combustible de l'avenir à plus long terme. Cela nécessitera encore des recherches et des développements techniques, une adaptation de la réglementation et la création d'infrastructures d'approvisionnement.

Les avancées techniques et les mesures économiques ne seront cependant pas suffisantes pour que le choix de la voiture électrique, comme celui du bateau, s'impose rapidement, même dans les milieux les plus sensibles. Des mesures réglementaires doivent les accompagner, mesures réglementaires qui pour la plupart existent mais qu'il faut avoir la volonté et le courage de faire respecter.

Chaque nuit des milliers de personnes sont réveillées par le bruit de motos circulant à 150 km/h en agglomération. Est-ce si difficile d'identifier le contrevenant ou faut-il le laisser devenir le héros des jeunes utilisateurs de vélomoteurs, bruyants eux aussi et dont l'éducation aura pour base le non-respect de leur prochain ? Quels comportements auront-ils quelques années plus tard au volant de leur automobile ? Les chiffres parlent clairement, il suffit d'observer que les accidents de la route sont la cause de 40 % des décès de la tranche d'âge de 15 à 24 ans.

La banalisation de la mort sur la route est un fait de société. Il est significatif d'observer que l'essentiel des mesures proposées contre le bruit et les risques de collision sont des mesures de protection. Cela n'est pas sans rappeler la compétition entre l'obus et le blindage. On propose toutes sortes de protections qui ne sont pas inutiles mais qui seraient bien plus efficaces si, corrélativement, on maîtrisait les nuisances à la source.

Un important effort d'éducation doit être fait à tous les niveaux. Une expérience d'apprentissage de la conduite sur voiture électrique est en cours, elle implique 30 voitures-écoles électriques et plus de 500 permis de conduire ont déjà été délivrés.

Les progrès techniques de la voiture et du bateau électriques, qui font prendre conscience de la nécessité de ne pas gaspiller l'énergie, dont la conduite est apaisante et qui respectent l'environnement offrent une chance à saisir d'urgence. Ce renouveau doit être durable si l'on se sent responsable des conditions de vie des générations futures.