

VÉHICULES ÉLECTRIQUES

Lynne C. Myers
Division des sciences et de la technologie

Octobre 1997



Bibliothèque
du Parlement

Library of
Parliament

**Direction de la
recherche parlementaire**

La Direction de la recherche parlementaire de la Bibliothèque du Parlement travaille exclusivement pour le Parlement, effectuant des recherches et fournissant des informations aux parlementaires et aux comités du Sénat et de la Chambre des communes. Entre autres services non partisans, elle assure la rédaction de rapports, de documents de travail et de bulletins d'actualité. Les attachés de recherche peuvent en outre donner des consultations dans leurs domaines de compétence.

**THIS DOCUMENT IS ALSO
PUBLISHED IN ENGLISH**

TABLE DES MATIÈRES

	<u>PAGE</u>
HISTORIQUE	1
LE FACTEUR CALIFORNIEN	3
QU'EST-CE QU'UN VÉHICULE ÉLECTRIQUE?	5
AVANTAGES ET INCONVÉNIENTS DES VÉHICULES ÉLECTRIQUES	6
ACCUMULATEURS	9
A. Accumulateurs au plomb	9
B. Accumulateurs au nickel-cadmium et au nickel-fer	11
C. Accumulateurs au nickel-hydrure métallique	11
D. Accumulateurs au sodium-soufre	12
E. Accumulateurs au lithium	13
F. Accumulateurs au zinc-air et à l'aluminium-air	14
G. Piles à combustible	14
VÉHICULES HYBRIDES	16
VÉHICULES ÉLECTRIQUES SUR LE MARCHÉ EN 1997	17
CONCLUSION	19



CANADA

LIBRARY OF PARLIAMENT
BIBLIOTHÈQUE DU PARLEMENT

VÉHICULES ÉLECTRIQUES

HISTORIQUE

Pour beaucoup de gens, le véhicule électrique constitue le meilleur espoir à court terme de voir exister une voiture sans émission polluante. Peu se rendent compte, toutefois, que les véhicules électriques existent depuis aussi longtemps que les voitures à essence. Les toutes premières automobiles étaient propulsées par des moteurs à vapeur, semblables à ceux des locomotives à vapeur. On utilisait du charbon, ou encore un autre combustible, pour produire de la vapeur sous pression, laquelle servait ensuite à pousser un cylindre et à propulser le véhicule. Ce procédé était très encombrant et il s'avérait dangereux à cause des explosions possibles de la chaudière; de plus, il exigeait des compétences particulières de la part du conducteur. C'est la raison pour laquelle la voiture à vapeur a fait long feu.

L'essence et l'électricité constituaient toutes les deux un carburant commode, facile à transformer en énergie mécanique à l'aide d'un moteur simple. À partir de 1850, on a donc commencé à mettre au point des voitures électriques et, dans les premières années de l'industrie automobile, les deux technologies se sont livrées concurrence pour dominer le marché.

Selon certains, c'est un inventeur écossais, Robert Davidson, qui a mis au point le premier prototype de voiture électrique en 1837. Le premier véhicule électrique à quatre roues a été construit en 1891 à Des Moines, dans l'Iowa. Ce véhicule, qui pouvait transporter 12 personnes, nécessitait apparemment 24 batteries (accumulateurs) qu'il fallait charger pendant 10 heures, et il pouvait rouler pendant 13 heures à la vitesse maximale de 22,5 km/h. Cependant, il n'a jamais été produit en quantité. Le premier véhicule électrique à avoir été produit en plusieurs exemplaires est l'*Electrobat*, qui était fabriqué par une compagnie de Philadelphie. Entre 1895 et 1920, une cinquantaine de compagnies ont fabriqué des véhicules électriques⁽¹⁾. En 1900, 38 p. 100 des nouveaux véhicules automobiles construits aux États-Unis étaient

(1) Electric Vehicle Association of the Americas (EVAA), <http://www.radix.net/~futurev/facts.html>, 1997.

propulsés à l'électricité⁽²⁾, et en 1912, il y avait quelque 34 000 voitures électriques immatriculées aux États-Unis.

Comme c'est le cas aujourd'hui, la batterie s'est révélée l'inconvénient premier de la voiture électrique face à la concurrence. Le stockage de l'essence à bord fournissait plus de puissance, sur de plus longues distances et pour un poids moindre, que les batteries électriques. Avec l'invention du démarreur électrique en 1912, et compte tenu de la disponibilité et de l'abondance du pétrole, les véhicules propulsés à l'essence ont pris à peu près tout le marché de la voiture neuve, en particulier aux États-Unis, où les derniers véhicules électriques d'usage général ont été assemblés en 1940⁽³⁾.

L'histoire du développement du véhicule électrique en Amérique du Nord est une succession de hauts et de bas. Malgré la domination de l'automobile à essence sur le marché, les constructeurs automobiles du monde entier ont constamment maintenu au moins un programme modeste de mise au point d'un véhicule électrique concurrentiel. Durant les années 60, les préoccupations grandissantes au sujet de la pollution de l'air dans les villes congestionnées par les voitures ont amené les grands constructeurs à tenter de produire un véhicule électrique concurrentiel. Le coût élevé de ces véhicules et le manque de demandes ont cependant miné leurs efforts. Même si les crises pétrolières des années 70 ont ravivé une fois de plus l'intérêt pour l'auto électrique, les événements ont à nouveau conspiré durant les années 80 pour réduire l'activité dans ce domaine, car le prix de l'essence s'est stabilisé et les voitures à essence sont devenues moins polluantes et plus efficaces pour ce qui est de l'utilisation de l'énergie. Les véhicules électriques semblaient destinés à ne jamais sortir d'un cercle vicieux. Les gens ne les achèteraient pas parce qu'elles seraient trop coûteuses, et les fabricants n'en construiraient pas en quantité, ce qui aurait fait baisser les prix, parce que la demande était très faible.

La réintroduction du véhicule électrique sur le marché ces dernières années découle avant tout du besoin de répondre aux exigences de la Californie et de certains autres États américains qui réclament que les véhicules à émission nulle (*zero emission vehicles (ZEV)*) composent un pourcentage donné de l'ensemble de véhicules vendus par chaque constructeur

(2) A. Haskell *et al.*, *An Introduction to Electric Vehicles*; voir adresse Internet <http://www.suhep.phy.syr.edu/car/links.html>.

(3) *Ibid.*

pendant une période donnée. Ces exigences sont présentées en détail ci-après sous la rubrique « Le facteur californien ».

En raison de cette récente évolution de la situation, la voiture électrique semble une fois de plus sur le point d'envahir le marché. À l'heure actuelle, environ 4 000 véhicules électriques roulent aux États-Unis, la plupart convertis à partir de voitures existantes. On s'attend cependant à ce que des véhicules neufs propulsés à l'électricité commencent à apparaître en plus grand nombre sur le marché à partir de 1997-1998.

LE FACTEUR CALIFORNIEN

En Californie, selon des modifications apportées en 1990 à la *California Clean Air Act*, deux pour cent de toutes les voitures mises en vente par n'importe quel constructeur automobile faisant affaire en Californie devront, dès 1998, être des véhicules à émission nulle. Cette part devra passer à 5 p. 100 d'ici 2001 et à 10 p. 100 d'ici 2003. Le véhicule électrique est à l'heure actuelle le seul candidat au titre de ZEV. Il faut se rappeler cependant que le véhicule électrique n'est pas tout à fait à émission nulle. L'électricité utilisée pour charger les batteries doit être produite par une forme d'énergie quelconque. Si cette électricité provient d'une centrale au pétrole, au charbon ou au gaz naturel, des émissions ont été produites; la différence, c'est qu'on les a déplacées des zones urbaines où l'air est déjà pollué et où il y a des voitures en très grand nombre vers des lieux plus isolés et moins pollués. Ce n'est que si l'électricité est produite par une source non polluante, comme le nucléaire, l'énergie solaire ou l'énergie éolienne que le véhicule électrique peut vraiment être considéré à émission nulle.

Les règlements californiens, qui ont été par la suite adoptés par un certain nombre d'autres États, ont poussé les constructeurs automobiles à redoubler d'efforts pour mettre au point et produire en série des véhicules électriques. La demande californienne de véhicules neufs dépasse 900 000 unités par année, ce qui offre un marché potentiel de quelque 18 000 véhicules électriques en 1998 (2 p. 100 du total). Voilà une part de marché que les constructeurs ne peuvent se permettre d'ignorer, et elle est suffisante pour permettre la production de masse. Le législateur californien espère que cette exigence brisera le cercle vicieux de la demande insuffisante. Si certains sont enthousiastes face à cette démarche et estiment qu'elle ouvre le marché à une technologie écologique, d'autres par contre se montrent

moins fervents face à la rapidité à laquelle, selon eux, les véhicules électriques sont introduits sur le marché.

Dans un article récent, un groupe de chercheurs du Massachusetts Institute of Technology (MIT) ont examiné l'effet global sur l'environnement et l'économie de la construction et de l'utilisation des véhicules électriques fabriqués à partir de matériaux divers et utilisant divers types de batteries. Ils ont également comparé le recours à la voiture électrique à d'autres méthodes visant à réduire la pollution de l'air. Leurs conclusions sont les suivantes :

Les véhicules électriques destinés au marché général et pouvant rouler sur les routes n'ont été ni produits, ni testés en volume suffisant pour toute la gamme des conditions de conduite. Leur fiabilité durant une période normale de garantie, par exemple, trois ans et 50 000 milles (80 468 km) est inconnue. Les véhicules électriques destinés à la route en sont encore au stade très expérimental⁽⁴⁾.

Les auteurs de l'article affirment aussi que les véhicules électriques contribueront très peu à l'amélioration de la qualité de l'air dans les villes et qu'ils seront très coûteux. Ils proposent d'autres mesures qui, selon eux, seraient beaucoup plus rentables pour ce qui est d'atteindre la réduction souhaitée des émissions produites par les véhicules.

À notre avis, la politique du véhicule électrique établie par le California Air Resources Board n'est ni rentable, ni pratique. Les véhicules électriques ne contribueront pas de façon significative à la qualité de l'air si on les lance comme on le propose maintenant; d'ici 10 ans, leur effet sera imperceptible par rapport à celui qui découlera d'améliorations majeures dans les technologies de l'automobile et de la combustion. En outre, même si on pouvait la justifier pour des raisons écologiques, la technologie de la voiture électrique est encore loin de répondre aux besoins d'un marché de masse et on ne sait pas quand elle pourra y répondre. Finalement, les coûts projetés de la politique californienne à l'égard des véhicules électriques sont énormes, et exigeront des subventions allant de 10 000 à 20 000 \$ US par véhicule⁽⁵⁾.

Selon les chercheurs, les Californiens profiteraient davantage d'une série de mesures donnant des effets immédiats à moindre coût. Ainsi, ils proposent une campagne

(4) R. De Neufville *et al.*, « The Electric Car Unplugged », *Technology Review*, janvier 1996, p. 32 (traduction).

(5) *Ibid.* (traduction).

d'achat et de remplacement des véhicules les plus polluants qui circulent sur les routes (de sept à dix pour cent des voitures sont de vieux modèles de voiture responsables de la moitié des émissions routières d'hydrocarbures et de monoxyde de carbone), des désincitatifs à la conduite, comme des tarifs de stationnement plus élevés, ainsi que la promotion du covoiturage et du recours plus généralisé aux autobus.

À ces arguments, les législateurs californiens rétorquent qu'il fallait mettre fin au cercle vicieux dans lequel le développement du véhicule électrique était condamné par une demande insuffisante et la demande demeurait faible parce que ces véhicules n'étaient pas offerts sur le marché. Selon eux, en obligeant la présence sur le marché de véhicules électriques en nombre non négligeable, la Californie a fait plus que tout autre État pour favoriser leur apparition. Qu'on soit d'accord ou non avec l'approche de cet État, force est de constater qu'elle a eu une incidence indiscutable sur la recherche et le développement dans ce domaine.

Malgré leur optimisme, même les législateurs californiens favorables aux véhicules électriques ont dû accepter que les constructeurs ratent l'objectif de 1998; en mars 1996, les cibles de 1998 et 2001 ont été éliminées, et seules celles de 10 p. 100 en 2003 ont été maintenues. Selon certains analystes, au rythme actuel, seulement 5 000 voitures électriques de plus seront vendues aux États-Unis avant la fin du siècle.

QU'EST-CE QU'UN VÉHICULE ÉLECTRIQUE?

Le véhicule électrique est radicalement différent des voitures d'aujourd'hui propulsées à l'essence, où un moteur à combustion dépend de la combustion d'un carburant conservé à bord du véhicule pour produire la puissance motrice. Les véhicules classiques ont besoin d'un moteur qui tourne tout le temps et dont la puissance est transformée par une série d'engrenages qui font tourner les roues et par un alternateur fournissant de l'électricité aux accessoires comme les phares et l'air climatisé. Plutôt que l'essence, la voiture électrique conserve ses réserves dans de grosses batteries rechargeables. Dès que la voiture est mise en marche, une commande envoie l'électricité directement aux moteurs électriques qui font tourner les roues. Il n'est besoin ni d'engrenage, ni d'embrayage, ni de silencieux, puisqu'il n'y a pas de

combustion bruyante. L'énergie ne passe que lorsque le conducteur appuie sur l'accélérateur, de sorte qu'elle n'est pas gaspillée quand la voiture est au repos ou qu'elle roule sur son élan⁽⁶⁾.

Bien des véhicules électriques qui font maintenant leur apparition sur le marché sont équipés d'un système de freinage par récupération qui recharge la batterie et augmente donc l'efficacité de l'opération, le moteur agissant comme générateur lorsque la voiture ralentit parce qu'il est alors « inversé ». Plutôt que de dissiper l'énergie en chaleur en freinant (ce qui arrive en raison de la friction que provoque l'utilisation des disques ou des tambours de frein dans un véhicule à essence), le moteur du véhicule électrique contribue au freinage et génère du même coup de l'électricité, qui recharge la batterie⁽⁷⁾. De cette façon, près de la moitié de l'énergie cinétique de la voiture électrique revient à la batterie, lui conférant ainsi un avantage certain dans les déplacements urbains en marche-arrêt.

Le véhicule électrique présente aussi un autre avantage : l'efficacité avec laquelle il convertit l'énergie disponible en force motrice. Un véhicule électrique transforme en effet 90 p. 100 de l'énergie électrique contenue dans ses batteries en force motrice, tandis qu'un moteur à combustion interne utilise moins du quart de l'énergie de l'essence. Même en tenant compte du fait que l'électricité utilisée dans le véhicule électrique a été produite dans une centrale dont le rendement moyen est d'environ 33 p. 100, on retrouve encore un avantage de rendement de 5 p.100 par rapport à l'auto à essence, rendement qui augmentera avec les améliorations techniques apportées à la production d'électricité, par exemple, la production à cycle combiné⁽⁸⁾.

AVANTAGES ET INCONVÉNIENTS DES VÉHICULES ÉLECTRIQUES

Les partisans du véhicule électrique disent qu'il s'agit d'un véhicule écologique et propre, voire à émission nulle. Cela est vrai pour ce qui est du fonctionnement du véhicule lui-même. Les véhicules électriques peuvent en effet contribuer à réduire les émissions atmosphériques polluantes résultant de la circulation automobile. Comme nous l'avons déjà dit cependant, on ne peut considérer que l'électricité produite pour charger les batteries est propre et

(6) D. Sperling, « The Case for Electric Vehicles », *Scientific American*, novembre 1996, p. 54-55.

(7) Site Internet de la compagnie Ford, janvier 1997 (www.ford.com).

(8) Sperling (1996), p. 55.

sans émission que si sa source est nucléaire, solaire ou éolienne. Autrement, le véhicule ne fait que déplacer la source de pollution loin de la ville congestionnée, plutôt que de l'éliminer.

Les publications de Ford sur les véhicules électriques signalent deux avantages supplémentaires. Les véhicules électriques sont silencieux et leur moteur n'émet pratiquement aucun bruit. Étant donné qu'aucune combustion n'a lieu, un silencieux n'est pas nécessaire pour atténuer le bruit. En fait, selon Ford, le moteur électrique est si silencieux qu'il faut maintenant trouver une façon de faire taire les autres bruits, comme celui de l'air climatisé et de la transmission, qui ne seraient pas normalement audibles dans une voiture à moteur à explosion. Le deuxième avantage des véhicules électriques est la douceur de roulement. La plupart des voitures électriques avancées utilisent un moteur à courant alternatif à une seule vitesse, sans transmission, ce qui rend l'accélération douce et continue, plus douce que les meilleures transmissions des voitures de luxe d'aujourd'hui.

Les véhicules électriques sont non seulement silencieux et propres, parce qu'il n'y a ni transmission ni groupe propulseur classique, mais de plus il n'est plus besoin de faire la vidange d'huile et de liquide de refroidissement du radiateur, ni de procéder à des mises au point ou des tests d'émission périodiques. Le recours réduit aux lubrifiants et aux liquides de radiateur devrait avoir un effet positif sur l'environnement, étant donné qu'il y aura moins de fuites de ces substances sur les routes, à un moment donné, dans les bassins versants.

Un des aspects négatifs du côté environnement, que certains chercheurs ont noté, est l'utilisation plus considérable des accumulateurs au plomb, qui est le type d'accumulateur le plus fréquemment employé à l'heure actuelle dans les véhicules électriques; la pollution par le plomb pourrait donc s'accroître si les véhicules électriques devenaient plus courants. Selon des recherches menées dans une université américaine, les véhicules électriques requis pour que l'objectif fixé par la Californie soit atteint produiraient 60 fois plus de plomb par kilomètre que les véhicules à essence. Un des auteurs de l'étude a noté ce qui suit :

Une des conclusions fondamentales de notre étude, c'est que l'arrivée des voitures électriques augmentera le niveau total de pollution par le plomb même s'il peut y avoir transfert de celles-ci de la route à l'usine de fabrication de l'accumulateur, où elle est moins visible. En fait, on prévoit que la pollution par le plomb sera considérablement supérieure à ce qu'elle était du temps où l'essence était enrichie au tétraéthyle de plomb⁽⁹⁾.

(9) J. Haggin, « Electric Cars Projected to Raise Lead Pollution », *Chemical and Engineering News*, 22 mai 1995, p. 7 (traduction).

Un second groupe de chercheurs estime toutefois que ces conclusions alarmistes se fondent sur des données fausses; son évaluation de la quantité de plomb supplémentaire qui serait libérée dans l'environnement à la suite de la mise en service des voitures électriques est beaucoup plus modeste. Par ailleurs, l'International Centre for Technology Assessment (CTA) note dans son analyse de la première étude que :

Même dans le pire des cas, les résidus à base de plomb ne dépasseraient pas plus de trois fois (et non 60 fois) la quantité de plomb libérée par l'essence au plomb. En outre, la plus grande quantité de ce plomb serait sous forme de déchets solides faciles à gérer localement, et non d'émissions atmosphériques⁽¹⁰⁾.

À ce jour, on a critiqué les véhicules électriques pour leur autonomie relativement limitée. Ainsi, avec la batterie la plus couramment employée, soit l'accumulateur au plomb, le rayon d'action n'est que 80 km. Avec d'autres batteries, on peut atteindre 160 km. Une voiture de la compagnie Solectrica a récemment battu le record d'autonomie pour un véhicule électrique, en parcourant 603 km sans avoir à être rechargée⁽¹¹⁾. Cependant, les accumulateurs les plus avancés demeurent plutôt coûteux. Ford résume ainsi la situation :

Les consommateurs veulent un véhicule ayant un rayon d'action de 100 milles, qui ne coûte pas plus cher à l'achat et à l'entretien qu'une automobile ordinaire. Dans les faits, les voitures électriques actuelles ont un rayon d'action de seulement 50 milles (80,4 km), coûtent de deux à trois fois plus cher à l'achat qu'une voiture classique et ont des accumulateurs qui doivent être remplacés aux deux ou trois ans, au coût de 3 000 à 5 000 \$⁽¹²⁾.

Le prix est un problème majeur tant pour les constructeurs que pour les acheteurs de véhicules électriques⁽¹³⁾. Il varierait, selon les estimations, de 34 000 \$ US pour l'EV1 de GM, qui utilise des accumulateurs au plomb, à 75 000 \$ US pour la Solectrica, mise au point par un constructeur indépendant. Le principal facteur de la différence de prix est la batterie : celle de l'EV1 est une batterie avancée au plomb, tandis que celle de la Solectrica est un

(10) « Centre for Technology Assessment Refutes Carnegie-Melon Analysis », *The Clean Fuels Report*, avril 1996, p. 190.

(11) EVAA (1997), p. 2.

(12) *Ibid.*

(13) Sperling (1996), p. 58.

accumulateur au nickel-hydrure métallique. De toute évidence, l'amélioration des accumulateurs constitue la clé de la réduction du coût et de l'accroissement du rayon d'action des véhicules électriques, ce qui favoriserait ces derniers sur le marché. Dans le monde, de nombreuses compagnies investissent beaucoup d'argent dans la R-D en vue de trouver de meilleurs accumulateurs. Les progrès dans ce domaine ont été rapides ces dernières années, aiguillonnés en bonne partie par le marché forcé de la Californie.

ACCUMULATEURS

A. Accumulateurs au plomb

La plupart des gens connaissent déjà bien l'accumulateur au plomb, puisque c'est la batterie utilisée dans les voitures classiques modernes. Quand le moteur tourne, la batterie est chargée par le générateur, puis par l'alternateur. La puissance de la batterie alimente les composants électriques et électroniques de l'automobile comme le démarreur, les phares, le système de chauffage, le système de climatisation et la radio. Dans un véhicule électrique, l'accumulateur fait également fonctionner les moteurs électriques qui sont directement reliés aux roues et font avancer la voiture. Sur beaucoup de voitures électriques, le freinage par récupération permet une certaine recharge pendant que le véhicule est en marche. Avec ce type de système, le courant électrique est inversé lorsque le conducteur appuie sur le frein, ce qui recharge la batterie et prolonge sa durée.

Il est évident que pour fournir toute la puissance requise par un véhicule électrique, la batterie au plomb devrait être plus grosse et plus puissante que celles fabriquées actuellement. Les batteries classiques seraient complètement usées après 30 recharges; elles ne conviennent donc pas aux voitures électriques. Les batteries au plomb utilisées dans ces dernières sont des batteries dites à décharge poussée. Elles sont constituées de minces plaques d'acier très hautes et sont conçues pour durer de 400 à 800 cycles charge-décharge. Lorsque la température est au point de congélation, cependant, ces batteries, telles qu'elles existent actuellement, ne fonctionnent qu'à 70 p. 100 de leur capacité. Étant donné le climat au Canada, il faudrait de toute évidence qu'elles soient placées dans un boîtier isolé et que la voiture soit dotée d'un système de chauffage quelconque⁽¹⁴⁾.

(14) EVAA (1997), p. 1.

En 1992, compte tenu de la nécessité d'améliorer les batteries, 49 compagnies américaines ont formé un consortium pour effectuer de la recherche fondamentale afin d'améliorer la durée de vie et l'énergie spécifique des batteries au plomb tout en préservant leur densité de puissance et leur coût. L'Advanced Lead Acid Battery Consortium (ALABC) cherchait également à réduire sensiblement le temps de recharge des batteries. Le travail du consortium a donné une bonne partie des progrès enregistrés depuis; selon une publication récente, celui-ci a réussi à atteindre bon nombre de ses objectifs.

Pour ce qui est du temps de recharge, une nouvelle technique, dite à impulsion rapide, s'est révélée très efficace, faisant passer le temps requis pour recharger une batterie déchargée à 80 p. 100 de plusieurs heures à seulement 15 minutes. Comme avantage inattendu, signalons que cette nouvelle méthode porte également la durée de vie de la batterie de quelque 250 cycles à près de 1 000 cycles⁽¹⁵⁾.

Le ALABC cherche également à réduire le poids des batteries en utilisant de nouvelles méthodes de traitement et en ajoutant des alliages différents. Le recours à des grilles plus fortes, plus minces et plus résistantes à la corrosion a déjà amélioré l'énergie spécifique (wattheures produits par kg), la faisant passer de 35 wattheures en 1994⁽¹⁶⁾, à 48 wattheures par kg en 1996⁽¹⁷⁾ dans un prototype. Le rayon d'action des véhicules électriques à batterie au plomb demeure d'environ 241 km entre les recharges.

Résultat de toutes ces améliorations, le coût des batteries au plomb a diminué radicalement depuis cinq ans. En 1992, ce coût était de 1,11 \$ US/mille pour le propriétaire; il a été réduit à 0,11 \$/mille en 1995. Si les progrès se poursuivent au même rythme, il pourrait tomber à 0,5 \$/mille au plus tard en 1998⁽¹⁸⁾. Il est clair que les projets de ce type rendront les voitures électriques plus attrayantes pour les consommateurs.

(15) « Advanced Lead-Acid Battery Consortium Meets First Phase Goals », *The Clean Fuels Report*, novembre 1996, p. 176.

(16) D. Iman, « Automakers Move Towards New Generation of 'Greener' Vehicles », *Chemical and Engineering News*, 1^{er} août 1994, p. 12.

(17) *The Clean Fuels Report* (nov. 1996), p. 177.

(18) *Ibid.*

B. Accumulateurs au nickel-cadmium et au nickel-fer

Les accumulateurs au nickel-cadmium ne sont pas nouveaux. Ces batteries rechargeables sont d'utilisation courante dans l'équipement électronique, des radios portatives aux jeux vidéo. Certaines compagnies nord-américaines ont envisagé de les utiliser dans les véhicules électriques, mais cette technologie n'a pas été aussi largement acceptée ici qu'en Europe. En octobre 1995, la société Saft de France a ouvert sa première usine de production de batteries pour le marché automobile. Cette usine, qui a coûté quelque 20 millions de dollars américains à construire, produira initialement 5 000 accumulateurs au nickel-cadmium par année.

Les batteries produites dans cette nouvelle usine équiperont toutes les voitures électriques des constructeurs français : la Citroen AX, la Peugeot 106, ainsi que la Clio et l'Express de Renault. Les avantages des batteries au nickel-cadmium sont leur besoin d'entretien modeste et leur longue durée de vie, qui serait de près de 97 000 km. Le coût élevé, les problèmes de recyclage et de l'utilisation du cadmium, métal très toxique, ainsi que la tendance à la surchauffe, sont les principaux problèmes de l'utilisation de ces accumulateurs dans les voitures électriques⁽¹⁹⁾.

Les batteries au nickel-fer ont une densité énergétique élevée (quantité d'énergie par rapport à la taille de la batterie); elles ont donc l'avantage d'être plus petites que les autres batteries de même puissance. Pour les charger complètement cependant, il faut les surcharger de 11 p. 100, ce qui entraîne une perte d'eau et une accumulation potentiellement dangereuse d'hydrogène⁽²⁰⁾. L'Advanced Battery Consortium travaille à résoudre ces problèmes et inclut les batteries au nickel-fer et au nickel-cadmium dans la catégorie du court terme, c'est-à-dire des batteries qui devraient être offertes sur le marché entre 1996 et 1998.

C. Accumulateurs au nickel-hydrure métallique

La batterie au nickel-hydrure métallique semble être l'une des premières en ligne pour remplacer les batteries au plomb à moyen terme (1999-2001) dans les voitures électriques. Comme elle est faite de matériaux recyclables non toxiques, elle est jugée écologique⁽²¹⁾. Elle se

(19) « Saft Making Progress with a Number of Batteries », *The Clean Fuels Report*, juin 1996, p. 174.

(20) EVAA (1997), p. 2.

(21) *Ibid.*

compose d'hydroxyde de nickel et d'un alliage de vanadium, de titane, de nickel et d'autres métaux, et offre le double de l'autonomie des batteries au plomb actuelles. Aux États-Unis, la Ovonic Battery Company de Troy, au Michigan, bat actuellement la marche dans la mise au point de ce type d'accumulateur.

Contrairement à d'autres accumulateurs en cours de développement, les accumulateurs au nickel-hydrure métallique fonctionnent à des températures ambiantes de -6,6 à 38,8° C, sont totalement scellés et n'exigent pas d'entretien. Ils se rechargent en 15 minutes seulement. Toutes ces caractéristiques les rendent très intéressants. Depuis deux ans, ces accumulateurs ont été testés dans diverses voitures électriques ou converties à l'électricité, de la sous-compacte aux petits camions. Au total, 20 véhicules ont parcouru 160 000 km. Les tests révèlent que les accumulateurs au nickel-hydrure métallique donnent aux véhicules qui en sont dotés une autonomie deux fois plus grande que les accumulateurs au plomb perfectionnés.

Cependant, comme c'est le cas avec beaucoup de nouvelles batteries, le coût est très élevé et la production commerciale fait problème. Pour la compagnie Ovonic, la production commerciale de 1997 permettra d'équiper environ 2 000 voitures électriques. La production augmentera lentement, afin que soient préservées la qualité élevée et la grande fiabilité des prototypes. Si la production commerciale et la demande pouvaient réduire l'écart de prix par rapport à la batterie au plomb, la batterie au NiHM pourrait facilement faire concurrence à celle-ci à l'avenir⁽²²⁾.

D. Accumulateurs au sodium-soufre

Ford a utilisé une batterie au sodium-soufre (NaS) dans son Ecostar de 1992 parce qu'elle offre trois à quatre fois la densité énergétique de la batterie au plomb, c.-à-d. qu'à taille égale, elle produit trois ou quatre fois plus d'énergie. La batterie au NaS présente une autonomie d'environ 241 km, soit à peu près le double de celle d'une voiture électrique à batterie au plomb.

Cette batterie n'a cependant pas été très bien reçue, pour plusieurs raisons. La première, c'est qu'elle n'est pas conviviale : comme une des électrodes est faite de soufre fondu, la batterie doit fonctionner à une température variant de 300 à 350° C. Pour empêcher que le soufre et le sodium se solidifient, les batteries sont munies d'un dispositif de chauffage incorporé. À cause de cette exigence difficile, la batterie au NaS coûte actuellement sept fois plus cher que la batterie au plomb.

(22) *Ibid.*

Par ailleurs, on s'inquiète de la sécurité : deux véhicules d'essai de Ford équipés de ces batteries ont pris feu. Dans un proche avenir, il est peu vraisemblable que des batteries de ce type prennent de l'avance sur leurs concurrentes. Dans sept pays au moins, des compagnies considèrent cependant qu'elles offrent beaucoup de potentiel parce qu'elles utilisent des matériaux relativement bon marché et abondants. Ces compagnies cherchent toutes à tirer profit des avantages de cet accumulateur en tentant d'en éliminer les problèmes les plus embêtants⁽²³⁾. Comme dans le cas des autres types de batteries, la production de masse pourrait réduire rapidement les coûts.

E. Accumulateurs au lithium

Depuis 1992, les compagnies Nissan et Sony du Japon tentent de mettre au point un accumulateur au lithium. La voiture électrique Prairie Joy de Nissan, qui sera mise sur le marché au printemps de 1998 dans un programme limité de bail-achat, est le seul véhicule sur le marché (ou sur le point d'y être), qui fait usage de ce type d'accumulateur. Environ 100 véhicules seront mis sur le marché au Japon et, à la fin de 1997, la batterie au lithium sera testée sur le terrain en Californie dans une trentaine de mini-fourgonnettes d'un modèle nouveau.

La batterie au lithium permet de stocker à peu près trois fois plus d'énergie que les batteries au plomb et environ une fois et demie plus que les batteries au nickel-hydrure métallique. Elle dépasse également la densité de puissance de ses concurrentes, ce qui lui donne un plus grand rayon d'action. Cette batterie est beaucoup plus légère que les autres, et sa recharge beaucoup plus efficace.

Parmi les inconvénients, mentionnons que la batterie au lithium est environ deux fois plus chère que la batterie au plomb, en partie à cause du système de ventilation requis pour la rafraîchir, et en partie à cause du matériau utilisé. L'anode est faite de cobalt oxydé, l'électrolyte est une matière organique très pure et le système de commande requis pour une voiture propulsée à l'aide d'accumulateurs au lithium est très complexe⁽²⁴⁾.

Plusieurs autres batteries à base de lithium ont fait l'objet de recherches en Amérique du Nord. Mentionnons la batterie électrochimique basée sur un alliage de lithium, un sel fondu et un sulfure métallique, ainsi qu'une batterie au lithium-polymère. Les deux offrent

(23) *Ibid.*

(24) *Ibid.*, p. 5.

certaines avantages par rapport aux batteries au plomb avancées, mais le coût et plusieurs problèmes techniques font obstacle à leur mise au point. Au mieux, ces batteries sont des concurrents à long terme des batteries actuelles ou en développement.

F. Accumulateurs au zinc-air et à l'aluminium-air

Dans ces deux batteries, le métal (zinc ou aluminium) réagit avec l'oxygène atmosphérique, en présence d'un électrolyte, afin de produire de l'électricité et un composé métallique. Les plaques métalliques de l'accumulateur sont littéralement consommées dans la réaction. Lorsque l'aluminium ou le zinc est épuisé, le véhicule doit être conduit à une station où on retire les plaques usées et les résidus métalliques pour insérer de nouvelles plaques dans la batterie; tout cela se fait en quelques minutes. Les résidus métalliques peuvent alors être recyclés en nouvelles plaques d'accumulateur.

Une compagnie israélienne, Electric Fuel, a mis au point une batterie au zinc-air et l'a mise à l'essai dans 40 fourgonnettes. Il s'agit d'une batterie à densité énergétique dix fois plus élevée que la batterie au plomb⁽²⁵⁾. Plusieurs compagnies américaines travaillent également à la mise au point d'une batterie de ce type; une voiture électrique propulsée par une batterie au zinc-air a établi un nouveau record, soit plus de 1 609 km sur une seule charge. Le coût demeure un problème pour cette batterie, comme d'ailleurs pour la batterie à l'aluminium-air. Cette dernière intéresse les chercheurs depuis 1980 environ⁽²⁶⁾, mais elle demeure coûteuse; de plus, en raison de sa grande taille, elle ne pourrait probablement être utilisée que dans les gros véhicules.

G. Piles à combustible

Une pile à combustible est une cellule électrochimique dans laquelle l'oxygène de l'air réagit avec un combustible gazeux, produisant de l'énergie électrique. La pile à combustible diffère d'une batterie classique de plusieurs façons. La batterie est un simple dispositif d'entreposage de l'énergie : l'énergie qu'elle peut produire dépend de la masse des réactifs chimiques qu'elle contient. Avec le temps, les réactifs sont consommés et la batterie se

(25) *Ibid.*, p. 7.

(26) Comité spécial de l'énergie de remplacement du pétrole de la Chambre des communes, *Énergies de remplacement*, juin 1981.

décharge : il faut la recharger à partir d'une source électrique externe avant de pouvoir l'utiliser de nouveau.

Par contre, la pile à combustible est un dispositif de conversion d'énergie. Aucune de ses composantes n'est consommée lorsqu'elle fonctionne, de sorte que son fonctionnement continue aussi longtemps qu'on lui fournit des réactifs. Ainsi, dans certaines piles à combustible, l'oxygène et l'hydrogène sont mélangés, ce qui produit de l'eau et un courant électrique. Tant qu'on fournit de l'hydrogène et de l'oxygène, la cellule continue de produire de l'électricité. La R-D sur la pile à combustible a été considérable pendant la course à l'espace des années 50 et 60. Les fusées et les satellites exigent un approvisionnement électrique stable et très efficace, et c'est justement ce que la cellule électrochimique peut fournir.

Une compagnie canadienne, Ballard Power Systems, est active dans ce domaine depuis 1979. Elle a mis au point une pile à combustible qui est plus légère et plus petite que beaucoup d'autres sur le marché. Cette pile fait appel à des polymères légers (une membrane permettant l'échange de protons) et est très efficace. La pile à carburant Ballard a propulsé le premier véhicule à émission nulle en exploitation : un autobus. Tout a commencé par une coentreprise avec le gouvernement de la Colombie-Britannique et la société de transport de la province. En 1995, le prototype commercial de l'autobus propulsé par la pile à carburant Ballard était lancé. La dernière phase du développement est en cours; il s'agit d'un programme pluriannuel de démonstration de véhicules, avec la participation de la compagnie de transport de la Colombie-Britannique et de la Chicago Transit Commission.

La société Ballard, qui est également associée avec plusieurs compagnies automobiles, dont Daimler-Benz, General Motors et Nissan, travaille à mettre au point une pile à membrane d'échange de protons (MEP) destinée aux voitures. La pile MEP semble offrir les avantages de la légèreté et de la petite taille sur ses concurrentes. Comme elle est plus efficace, plus légère et moins encombrante, l'entreposage du carburant (généralement de l'hydrogène ou du méthanol) est encore requis, mais à long terme, la pile à carburant devrait être en mesure de bien concurrencer les batteries plus traditionnelles.

VÉHICULES HYBRIDES

La mise en marché d'un grand nombre de véhicules électriques pourrait être quelque peu gênée par des problèmes d'infrastructure et la performance limitée des véhicules. Ces deux facteurs causent la résistance des consommateurs. Afin de surmonter ces problèmes, et pour profiter des meilleures technologies disponibles, les chercheurs de plusieurs pays travaillent également à la mise au point d'un véhicule hybride qui combinerait les meilleurs avantages d'un moteur à essence efficace et de la propulsion électrique.

Dans la plupart des cas, on associe un moteur à combustion interne à une batterie et à une transmission électrique. Dans le véhicule hybride, les deux modes de propulsion pourraient être utilisés au mieux afin de permettre une efficacité globale plus élevée que celle obtenue par les véhicules utilisant seulement l'un ou l'autre mode de propulsion. Ainsi, on a estimé que ces véhicules pourraient doubler ou tripler l'efficacité des voitures actuelles⁽²⁷⁾. Tous les grands constructeurs automobiles travaillent à la mise au point d'une voiture électrique, mais, jusqu'à tout récemment, aucun n'en avait mis une sur le marché. En octobre 1997, Toyota a annoncé qu'elle se lançait immédiatement dans la vente de la voiture hybride Prius⁽²⁸⁾.

La Prius sera d'abord vendue au Japon, au prix d'environ 18 000 \$ US même si la compagnie estime qu'il lui en coûte environ 41 000 \$ US pour la produire. Elle considère cette subvention au consommateur comme un coût de publicité acceptable. En prenant les devants, Toyota a l'honneur d'être la première compagnie du monde à entrer sur ce qu'elle espère voir devenir un marché lucratif.

Cette voiture satisfait à l'exigence de faire fonctionner chacun des deux modes de propulsion à leur niveau optimal. À basse vitesse, lorsque le moteur à essence est le moins efficace, elle fonctionne à l'électricité, mais elle passe automatiquement à la propulsion à l'essence lorsque le véhicule atteint une certaine vitesse. Pour ce qui est de l'accueil que lui réserveront les consommateurs, la voiture hybride aura un avantage sur la voiture électrique, puisqu'elle peut faire le plein aux stations d'essence. Le moteur à essence et le système de freinage par récupération permettront de s'assurer que la batterie reste chargée.

Si on met de côté l'aspect accueil que réserve le consommateur à un tel type de voiture, on peut se demander quelle est la logique d'ajouter un moteur à essence polluant à une voiture électrique lorsque l'objectif est de réduire la pollution; toutefois, comme les moteurs qui

(27) *The Clean Fuels Report* (1996), p. 183.

(28) « Toyota Introduces Gasoline-Electric Hybrid Car », *The Ottawa Citizen*, 16 octobre 1997, p. D4.

seront utilisés dans les voitures hybrides sont très efficaces, le niveau des émissions sera très modeste. Selon une étude récente faite par une firme de consultants américains, lorsque l'électricité servant à propulser une voiture électrique provient d'une centrale au charbon, la voiture hybride pourrait être une solution moins polluante que la voiture électrique si on considère toute la durée de vie du véhicule. Les consultants ont déclaré ce qui suit :

Aux États-Unis, plus de la moitié de l'électricité est produite à partir du charbon. Par conséquent, les voitures électriques y produiront des émissions de gaz à effet de serre plus élevées que celles que produisent des véhicules hybrides de taille comparable, qui utilisent de l'essence⁽²⁹⁾.

Cette observation n'a pas échappé aux législateurs californiens, qui continuent à chercher des façons de réduire la pollution automobile, même s'ils ont dû assouplir le calendrier d'introduction des véhicules à émission nulle. Ils ont modifié les normes destinées aux véhicules à émission nulle pour permettre l'arrivée des véhicules hybrides sur le marché. Cependant, on ne sait pas encore très bien si les normes très rigoureuses qui ont été fixées pourront être atteintes par les voitures hybrides actuelles. Dans les années que nécessitera le perfectionnement des véhicules électriques, il reste à savoir si les véhicules hybrides pourront relever le défi et capturer une part de marché.

VÉHICULES ÉLECTRIQUES SUR LE MARCHÉ EN 1997⁽³⁰⁾

Tous les grands constructeurs automobiles d'Amérique du Nord, de certains pays d'Europe et du Japon ont un modèle 1997 de véhicule électrique en vente. Voici un rapide compte rendu des véhicules sur le marché qui répondent aux exigences californiennes d'émissions nulles. Le lecteur trouvera, au tableau 1, un résumé de l'information, et ainsi que les caractéristiques des véhicules électriques destinés aux démonstrations internationales, celles fournies par les constructeurs qui se spécialisent dans la fabrication de ce type de véhicules et celles de plusieurs prototypes en cours de développement.

General Motors offre actuellement le EV1 au prix de 34 000 \$ US. Ce véhicule aurait un rayon d'action de 112 km en ville et de 144 km sur la route (à vitesse constante de 100 km/h). Le EV1 utilise des batteries au plomb. À 220 volts, il faut environ trois heures et

(29) *Ibid* (traduction).

(30) Sauf indication contraire, l'information fournie ici provient de divers numéros de 1996 et 1997 du *The Clean Fuels Report*.

demie pour les recharger complètement. Le propriétaire de ce véhicule devra acheter un chargeur domestique qui coûte 2 500 \$ et payer pour son installation, ou alors assumer des frais de 70 \$ par mois de location⁽³¹⁾. En 1996-97, le EV1 n'était offert qu'en location, et seulement chez certains concessionnaires Saturn de Californie et d'Arizona. La compagnie estime que la location protégera les premiers acheteurs des coûts élevés de réparation et d'entretien que pourraient nécessiter ces premiers véhicules de production. Cette mesure fait en sorte que l'acheteur n'aura pas à payer le coût du remplacement de la batterie.

GM vend également un pick-up électrique Chevrolet de la série S, qui utilise une batterie au plomb recyclable qu'on peut recharger (de 15 à 95 p. 100 de l'état de charge) en deux heures et demie. Ce pick-up peut parcourir environ 96,5 km à vitesse constante ou 64 km en marche-arrêt dans la circulation.

La mini-fourgonnette Epic de Chrysler est la version électrique de la Dodge Caravan et de la Plymouth Voyager, destinées au marché de la deuxième voiture familiale. Mise en vente en 1998, elle contiendra 27 batteries au plomb de 12 volts chacune. Ce véhicule a un rayon d'action d'une centaine de kilomètres, et une vitesse maximale de 128 km/h.

Parmi ces modèles de 1997, il y a les premiers pick-up Ford Ranger électriques. Avant, Ford avait vendu à une autre compagnie (Transportation Design and Manufacturing) des véhicules sans moteur ni transmission; celle-ci y installait un arbre de transmission électrique. Destiné principalement au marché des entreprises propriétaires de parcs de véhicules, le Ranger utilise 39 batteries au plomb de huit volts chacune et fait appel au freinage par récupération. Il a une autonomie de 56 km à 0° C (avec le système de chauffage en marche) et de 100 km sous des températures plus chaudes, mais sans l'air climatisé. La charge utile est d'environ 226,8 kg, et le prix d'environ 34 000 \$ US.

Les constructeurs japonais se lancent également dans la production de véhicules électriques, en visant le lucratif marché californien. Au printemps de 1997, Nissan a mis en vente et en location un nombre limité, probablement inférieur à 100, de véhicules électriques Prairie Joy. Ces véhicules sont très particuliers : ils utilisent des batteries légères, de grande capacité énergétique, au lithium. Ce véhicule peut transporter quatre personnes sur plus de 200 km avant que les batteries n'aient besoin d'être rechargées. La recharge complète dure environ trois heures. La Prairie Joy est destinée avant tout au marché des véhicules de livraison.

Honda est également entré dans la course pour fournir des véhicules électriques au marché californien. Au printemps 1997, elle a commencé à louer 300 véhicules électriques à

(31) J. Hiscock, « New Electric Car Has Enough Zip To Give GM Lead in Technology Race », *The Ottawa Citizen*, 6 décembre 1996, p. C9.

deux portes et quatre places aux consommateurs industriels de Sacramento et du sud de la Californie. Le Honda EV Plus peut rouler sur 200 km jusqu'à décharge complète et sur 160,9 km jusqu'à 80 p. 100 de décharge, et il peut atteindre une vitesse maximale d'environ 128 km/h. Le prix de location n'a pas été annoncé. La grande autonomie de ce véhicule est attribuable aux accumulateurs au nickel-hydrure métallique (NiHM) de la compagnie Ovonic Battery. Les batteries complètement déchargées se rechargent en huit heures sous un courant de 200 volts et sont censées durer en moyenne 100 cycles, soit quatre à cinq ans. Cependant, elles sont nettement plus coûteuses que les batteries au plomb.

Toyota a déjà testé son véhicule électrique RAV4 en Californie et dans l'État de New York de concert avec des compagnies de services publics, ainsi qu'à ses propres installations d'essai en Californie et au Michigan. Le RAV4 est un véhicule sportif utilitaire qui utilise des batteries au NiHM mises au point par la société Masushita. Ces batteries ont une durée de vie de six à huit ans et donnent aux véhicules roulant à la fois sur la route et en ville une autonomie de 188 km; la vitesse maximale est de 120 km/h. En 1998, Toyota mettra en vente 320 de ces véhicules en Californie. Le prix de vente exact n'est pas encore connu.

CONCLUSION

Qu'on soit d'accord ou non avec l'approche prise par la Californie pour que soit mis en vente dans son marché des véhicules à émission nulle, il n'y a pas de doute que le but est atteint : inciter les constructeurs automobiles et les fabricants de batteries à améliorer le rendement des véhicules électriques. Des centaines de compagnies participent à la course pour produire le meilleur véhicule électrique, au plus long rayon d'action, à la recharge la plus rapide et, bien sûr, au moindre prix.

Si l'intensité de cette concurrence se maintient et si le marché créé par la réglementation américaine continue de croître, on peut penser que des véhicules électriques ou hybrides efficaces, silencieux et peu coûteux seront mis en vente à l'intention de tous les consommateurs, y compris ceux du Canada, dans un avenir guère trop éloigné.

TABLEAU 1
RENDEMENT DES VÉHICULES ÉLECTRIQUES

Fabricant	Véhicule	Nombre de places	PBV ¹ (kg)	Rayon d'action (km)	Vitesse maximum (km/h)	Accélération (sec) 0-97 km/h	Type de moteur	Puissance (hp)	Type d'accumulateur
Mis sur le marché pour répondre aux exigences de la Californie en matière de véhicules électriques									
Chrysler	EPIC Van	5	2 676	97	129	16	à induction (CA)	100 maximum	au plomb
Ford	Ranger EV			56-121	121	<13 (jusqu'à 81)	à induction (CA)	90	au plomb
General Motors	EV1	2	1 347	113-145	129	8,5	à induction (CA)	137	au plomb
General Motors	Chev. S10 Pickup		2 336	64-97		10.3 (jusqu'à 81)	CA	114	au plomb
Honda	EV Plus	4	1 633	97-201	129	30,1	sans balais (CC)	66	au nickel-hydrure métallique
Nissan	Prairie Joy EV	4	1 690	193	121		aimant permanent	83	au lithium
Toyota	RAV4 EV	5	1 465	171-209	127	17,5	CA	60	au nickel-hydrure métallique
Véhicules utilisés dans le cadre de programmes de démonstration de véhicules électriques									
Citroen	Saxo Électrique	4		85					au nickel cadmium
Fiat	Panda Elettra	2	1 148	64	68	17,5		10	au plomb
Renault	Clio RT	4		90	97				au nickel-cadmium
Samsung Motors	SEV-IV	4		161			CC		au plomb
Volkswagen	Golf City Stromer	4	1 497	80	97			24	au plomb
Fabricants spécialisés dans les véhicules électriques									
BAT International	Electrovan		217						au zinc-air
Bombardier	NEV	2	578	48	40		CC	5	au plomb
Corbin-Pacific	Sparrow	1	449	97	97		en série (CC)	15	au plomb
Daihatsu	Micro	1	470	35	45				
Electric Auto Corp.	Silver Volt II	4		241-322	161	10	CC	163	au plomb-cobalt
PIVCO	City Bee	2	750	105					au nickel-cadmium
Solectria	Force	4	1 084	64-72	113	19	à induction (CA)		au plomb
Solectria	Force (option)			129-161					au nickel-hydrure métallique
Prototypes									
AC Propulsion	t-ZERO	2	1 089	97-161	140	5	CA	221	au plomb
Bertone	Z.E.R.	2		465	119				au plomb
Horlacher	Electric Coupe								
Zytek	Lotus Elise	2	870	193	145	11,2 (jusqu'à 145)	sans balais (CC)	201	au nickel-cadmium

¹PBV = Poids brut du véhicule

Source : *The Clean Fuels Report*, juin 1997, p. 175 (traduction).