

SOMMAIRE

INTRODUCTION : LES ESPOIRS DU VÉHICULE ÉLECTRIQUE SONT À CONFIRMER	5
LE VÉHICULE ÉLECTRIQUE : ATOUTS ET CONTRAINTES	7
I. Avantages et inconvénients du véhicule électrique	7
II. Un enjeu essentiel : l'innovation dans le domaine des batteries	10
LE VÉHICULE HYBRIDE : UNE SOLUTION DE TRANSITION	13
COMPARAISON DES SOLUTIONS ÉLECTRIQUES ET HYBRIDES ACTUELS ET FUTURS	17
I. Présentation des hypothèses	17
II. Les résultats techniques	20
III. Les résultats énergétiques	21
IV. Les résultats économiques	22
V. Evaluation tenant compte d'hypothèses plus réalistes	23
Principales conclusions	26
Choix entre la solution hybride série et la solution hybride parallèle	27
VI. Quel marché pour le véhicule électrique (hybride ou non) ?	28
L'HYDROGÈNE ET LES PILES À COMBUSTIBLES	31
I. Avantages et inconvénients liés à l'emploi de l'hydrogène	31
II. Les piles à combustibles	32
LES EXPÉRIENCES NATIONALES DE DÉVELOPPEMENT DU VÉHICULE ÉLECTRIQUE	33
I. En France	33
II. Aux Etats-Unis	34
III. Au Canada	35
IV. Au Japon	35
V. En Allemagne	36
PERSPECTIVES POUR L'AVENIR	39
I. Les raisons d'un choix	39
II. Face à ce défi, quelles doivent être les actions des Pouvoirs Publics	41
ANNEXES	
Annexe I : Appendix B - Federal Research on Alternative Transportation Fuels and Vehicles	47
Annexe II : Le programme américain de recherche pour les nouveaux véhicules (PNGV)	53
Bibliographie	57

INTRODUCTION : LES ESPOIRS DU VÉHICULE ÉLECTRIQUE SONT À CONFIRMER

Très sympathique à l'opinion publique, très agréable à l'usage, techniquement au point, le véhicule électrique, en dépit de tout l'intérêt qu'il représente pour la lutte contre la pollution liée à la voiture, n'a pas encore eu le succès que l'on était en droit d'espérer. Des recherches techniques très poussées ont été effectuées au cours de ces vingt dernières années par les constructeurs automobiles ; des investissements considérables ont été réalisés pour industrialiser les véhicules électriques et les rendre insérables dans une chaîne de production automobile conçue autour de la voiture traditionnelle, des efforts commerciaux ont été engagés pour arriver à toucher les meilleurs clients potentiels, ceux qui sont concernés par des petits trajets quotidiens et qui ramènent leur voiture à un point fixe chaque soir. Pourtant, l'innovation technologique est restée sans impact sur le marché.

La raison en est simple : le véhicule électrique avec les technologies de batteries actuellement disponibles est encore trop cher par rapport au véhicule thermique, son autonomie est limitée, et le consommateur réticent quand on lui demande d'accepter un surcoût important. Pourtant, à terme, il devrait en être tout autrement, car, d'une part, les technologies de batteries vont faire

des progrès, et d'autre part, il n'y a rien de plus simple qu'un véhicule électrique. Celui-ci devrait donc être logiquement meilleur marché à série comparable. Et c'est précisément dans cette transition vers le marché tel qu'il s'établira dans le futur que réside la difficulté : le véhicule thermique dispose d'un siècle de développement derrière lui, et de cela résulte les bas prix de revient liés aux séries de production importantes dont il bénéficie. Alors que le véhicule électrique ne peut aujourd'hui être construit qu'à l'état de prototype ou de présérie, donc avec des coûts trop élevés pour le consommateur. Il s'agit d'un cercle vicieux dont on ne peut sortir que par un « effet tunnel ». D'où la nécessité de rechercher les niches où le véhicule électrique a le plus de chances de se développer.

Le véhicule hybride, qui combine sur un même véhicule le moteur thermique conventionnel et la traction électrique, sera-t-il le moyen de faciliter cette transition et de faire ainsi basculer le marché ? Il est intéressant de faire le point sur la question et de montrer les éléments de réponse qui peuvent être apportés en fonction de l'« état de l'art » actuel des technologies industrielles.

LE VÉHICULE ÉLECTRIQUE : ATOUS ET CONTRAINTES

I. Avantages et inconvénients du véhicule électrique

Il faut rappeler les avantages, mais aussi les inconvénients, qui ont empêché le véhicule électrique de conquérir une part notable du marché de la voiture conventionnelle :

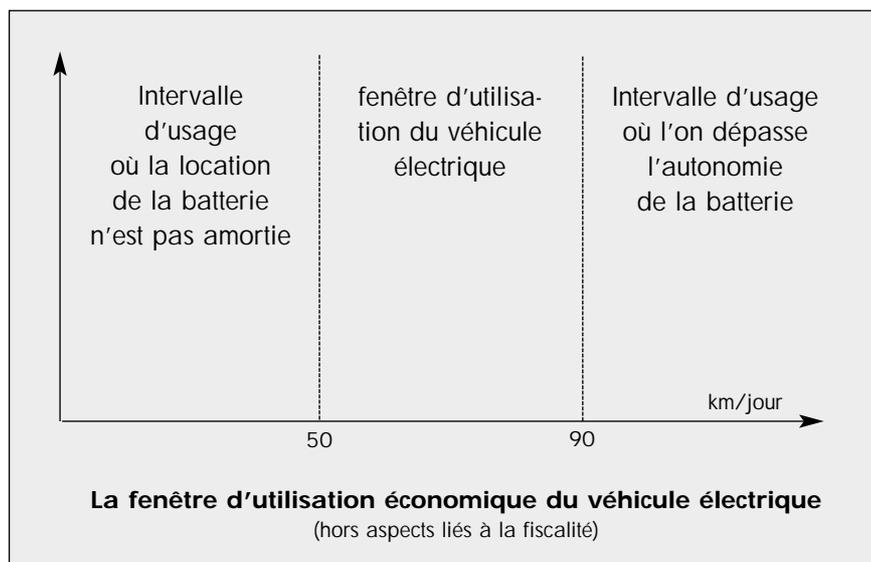
- L'atout principal du véhicule est qu'il ne pollue pas quand on l'utilise. Cela s'entend à la fois pour le bruit et pour la pollution de l'air. C'est un avantage indéniable pour le piéton ou même pour les automobilistes, utilisateurs ou non ; mais l'avantage est-il perceptible pour le conducteur lui-même ? Cela est beaucoup moins évident. Il y a un réel problème qui est d'internaliser dans la rationalité du consommateur individuel les avantages externes, collectifs, du véhicule électrique (pas de pollution urbaine).
- Le véhicule électrique, en France, réduit la production de dioxyde de carbone (CO₂), gaz à effet de serre, car l'essentiel de l'énergie électrique est produite par le nucléaire et notre production est actuellement excédentaire. A court ou moyen terme, son développement ne devrait pas faire appel à de nouvelles sources d'énergie, car il se recharge la nuit, dans une période de creux de la consommation électrique. Cela

est beaucoup plus discuté dans les autres pays. Par exemple en Allemagne, les écologistes sont contre le véhicule électrique parce que l'émission de CO₂ doit être calculée en tenant compte des pertes de rendement tout au long de la chaîne énergétique (depuis la génération de courant par la centrale électrique, parfois à partir de charbon, jusqu'au lieu de recharge du véhicule). Dès lors, que la production d'électricité est d'origine thermique, l'émission de CO₂ par le véhicule électrique est plus importante que celle produite par la voiture conventionnelle récente.

- Le véhicule électrique est lourd, à cause du poids des batteries. Celles-ci jouent le rôle de stockage de l'énergie et leur capacité dans cette fonction est très faible. On ne peut emmagasiner que 30 à 70 Wh dans un kg de batterie contre 10.000 Wh dans un kg de carburant. Il arrive un moment où le poids des batteries engendre un besoin d'énergie emmagasinée supplémentaire à cause de ce poids qui peut s'avérer très pénalisant dans les pays où les pentes naturelles des routes sont importantes.

- L'autonomie des véhicules électrique est certainement un handicap : de l'ordre de quelques dizaines de kilomètres. Cela varie en fonction du type de batterie, et de leur dimensions, mais reste en tout cas inférieur à 120 km. Pour l'utilisateur devant effectuer avec son véhicule des déplacements de toutes longueurs, cette faible autonomie est inacceptable, car il est condamné à reimmobiliser son véhicule durant plusieurs heures pour recharger sa batterie après seulement 1 ou 2 déplacements un peu longs (en région parisienne). Aujourd'hui, en raison de sa faible autonomie, le véhicule électrique est spécifiquement urbain.
- Le véhicule électrique nécessite des recharges fréquentes et longues (plusieurs heures). Cela ne peut être admis que si le véhicule fait partie d'une flotte ou que s'il appartient à un particulier le rechargeant durant la nuit. Bien sûr, il existe des dispositifs de recharge rapide. Mais ceux-ci nécessitent des équipements d'infrastructure coûteux (plus de 150.000 F par unité) qui ne sont pas à la portée du particulier, et sont encore peu répandus. De plus, la recharge dite rapide est encore assez lente (5 km/mn).
- Le prix du véhicule électrique est l'obstacle principal à sa diffusion. Compte tenu de sa faible production et du prix des batteries, le véhicule électrique revient 40 % à 50 % plus cher que la voiture conventionnelle, avant toute aide

de l'État et d'Électricité de France (EDF). On peut toutefois observer que le surcoût à l'achat des batteries est compensé par le faible prix du plein d'électricité. Celui-ci revient, en tarif de nuit, aux environs de 10 F les cent kilomètres. Mais peu de gens prennent en compte cette optimisation en terme de prix de revient global. Le prix d'investissement est un frein plus important à l'achat que le coût d'usage pour la plupart des acteurs. Pour contourner la difficulté, les constructeurs ont eu l'idée de séparer du prix d'achat celui des batteries en finançant celles-ci par une formule de location (qui revient à 580 F par mois pour un véhicule de type Citroën AX ou Renault Clio). Ce prix est, comme on l'a dit théoriquement compensé par le fait que l'automobiliste ne paie plus le carburant à la pompe et que l'électricité lui revient, en tarif de nuit à 10 centimes par km. Il en résulte donc, avec un litre d'essence à 6 F, une économie de 50 centimes par kilomètre. Mais il faut tout de même rouler 1.200 km par mois et exclusivement sur des petits parcours de moins de 80 km par jour pour justifier cette location, dont la mensualité coûte chaque mois, que la voiture roule ou non. Concrètement, cela exige de rouler tous les jours ouvrables un nombre suffisant de kilomètres pour amortir la batterie. On voit donc que la fenêtre est assez étroite, et que cela restreint considérablement les utilisateurs potentiels.



- Enfin, la batterie par elle-même n'est pas sans poser des problèmes. Il y a d'abord, comme pour tous processus chimiques, des contraintes d'utilisation (cinétique chimique, niveau de charge), et notamment, de température (par exemple, une batterie au plomb ne marche pas au-dessus de 50° C). Sortir du périmètre de ces contraintes peut nuire gravement à la longévité de la batterie.
- On dispose de peu de données sur les durées de vie des batteries utilisées dans des conditions de trajets aléatoires et non répétitives. Il y a un problème de fiabilité dès lors que l'on sort des conditions de charge acceptables, qui dépendent étroitement de la technologie ; et que l'on dépasse les limites de distance liées à l'autonomie. On peut certes confier à un dispositif de sécurité le soin de limiter la puissance disponible de la batterie quand son niveau de décharge atteint un degré limite. Mais ce service dégradé n'est pas acceptable pour certaines catégories d'usagers.
- Enfin, le véhicule électrique ne dispose pas par lui-même de moyen de chauffage. Si étonnant

que cela puisse paraître, on est obligé de rajouter à ce moteur non polluant un petit dispositif à fuel pour chauffer l'habitacle.

Quand on fait le bilan de toutes ces contraintes, on comprend que le véhicule électrique ne se soit pas encore imposé. Tous les problèmes concernent en fait un seul organe : la batterie, qui impose ses limites de stockage d'énergie (et de puissance pour les petites voitures électriques). **Rappelons que la quantité d'énergie que l'on peut stocker dans un kg de batterie est extrêmement faible quand on la compare à celle qui peut être mise dans un kg de carburant : le rapport est de l'ordre de 1 à 200. Toutefois, compte tenu des rendements respectifs du moteur électrique et du moteur thermique, le rapport réel de l'énergie disponible au niveau des roues n'est plus que de 1 à 20, environ.** On voit donc ici l'avantage de l'énergie fossile sur la batterie comme moyen de stocker l'énergie sur un véhicule que l'on désire doté d'autonomie. Le véhicule électrique est-il condamné pour autant ? Certainement pas si on le réserve à des usages spécifiques (véhicules de flotte, bus électriques, véhicules à usage partagé, véhicules urbains,...).

II. Un enjeu essentiel : l'innovation dans le domaine des batteries

Venons en maintenant au cœur du problème : la batterie.

1) Les alternatives en présence :

Il y a principalement deux techniques déjà développées et industrialisées pour la batterie, donc disponibles sur le marché.

- **La batterie plomb** : il s'agit de la batterie traditionnelle qui est utilisée couramment pour les voitures et donc déjà produite en grandes séries, mais pour une utilisation qui n'est absolument pas celle de la voiture électrique puisque concernant essentiellement le démarrage et l'éclairage de véhicule. L'énergie massique est faible, mais le prix est bas. Il y a aussi des problèmes de pollution ou de récupération du plomb, produit toxique.

- **La batterie « NiCd », ou « Nickel-Cadmium »**, qui est déjà produite en grande série dans l'industrie des piles et accumulateur, présente l'avantage d'une énergie massique meilleure et d'une durée de vie élevée ; mais aussi l'inconvénient d'être plus chère que la batterie plomb. Tout comme pour la batterie plomb, mais avec un degré toxicologique plus élevé, le cadmium pose un problème d'environnement et de récupération.

- D'autre part, il y a deux autres filières technologiques en cours de développement et suffisamment prometteuses pour des débouchés industriels proches.

- **La batterie NiMH, Nickel métal hydrure**, dans laquelle le nickel est associé des alliages métalliques permettant d'absorber des atomes d'hydrogènes donneur d'électrons. L'énergie massique est élevée, ainsi que la durée de vie, mais le coût est important tout comme la batterie NiCd.

Cette technique est déjà prouvée en laboratoire, mais pas encore produite en grande série. Son arrivée sur le marché est cependant très proche (prévue pour l'an 2000).

- **La batterie « Lithium-Ion »** (dont le Lithium-Carbonate) constitue la batterie du futur : en raison de son potentiel électrochimique plus élevé, elle permet de diviser, pour un même cahier des charges, le nombre d'éléments, le volume, le poids et le prix par un facteur de 2 à 3. Malheureusement, elle n'est pas encore suffisamment développée pour arriver à une production industrielle sur le marché avant 2000-2005. C'est aussi le cas de la technologie Lithium-polymère qui exploite le même élément Lithium pour son potentiel électrochimique.

- Enfin, il y a une technologie très prometteuse, mais à plus long terme (au-delà de 2005-2010) : celle des **piles à combustibles** qui à la différence des piles électrochimiques, n'utilisent pas comme énergie entrante l'électricité, mais un combustible. Toutefois, cette technologie de pointe, issue du spatial, exige un très grand effort de diminution des coûts et de réduction de taille de son système pour pouvoir être commercialisée sur le marché et embarquée sur un véhicule. Il est frappant de constater l'écart qui existe entre les efforts de recherche/développement très importants qui sont réalisés sur cette technique aux États-Unis et au Japon, et la relative modestie des sommes consacrées en Europe. Ce retard est particulièrement visible en France, où on a limité les efforts à la seule pile à combustibles, qui ne constitue pas pourtant l'essentiel du problème, celui-ci étant plutôt situé au niveau du système (pour la production de l'hydrogène nécessaire à l'alimentation de la

pile et pour l'embarquement sur véhicule).

2) Comparaison des performances

Les performances actuelles des batteries peuvent être ainsi comparées (voir tableau n° 1). Le coût actuel des batteries « plomb » est 2 à 4 fois moins élevé que celui des batteries Cadmium-Nickel ou NiMH, ce qui constitue un avantage économique certain à l'achat. Toutefois, cet avantage disparaît quand on considère, dans une approche appropriée au consommateur d'au-

jourd'hui, le coût d'usage (coût kilométrique de la batterie, compte tenu du nombre de cycles). Pour ce qui est des performances techniques, et notamment des énergies massiques et des puissances spécifiques l'avantage paraît être aux technologies NiCd et NiMH. Avec un avantage certain pour la solution « prouvée industriellement », NiCd, par rapport à la solution encore « laboratoire », NiMH. C'est d'ailleurs la technologie Ni Cd qui équipe les véhicules électriques français produits aujourd'hui par Renault et PSA. La solution Lithium-Ion est encore pour le futur.

Tableau n° 1

PERFORMANCES DES BATTERIES	
Type de batterie	Performances actuelles
Energie massique (Wh/kg)	
Plomb	35
NiCd	50
NiMH	70
Lithium-Ion (futur)	130
Puissance spécifique (W/kg)	
Plomb	200
NiCd	200
NiMH	200
Lithium-Ion (futur)	300
Coût spécifique (F/kWh)	
Plomb	200
NiCd	3000
NiMH	3000
Lithium-Ion (futur)	1000 à 2000
Durée de vie (nombre de cycles à 80 % DOD)	
Plomb	350
NiCd	1500
NiMH	1000 (prévu)
Lithium-Ion (futur)	1000 (prévu)

Dans le cas du véhicule électrique, le poids et le prix des batteries sont en relation directe avec l'autonomie désirée. Pour simplifier, il faut compter 1,8 km d'autonomie pour chaque Wh/kg d'énergie massique, cela conduit à 65 km avec la technologie plomb, et 90 km avec la technologie NiCd, toutes deux disponibles actuellement ; mais bientôt 200 km avec la technologie du futur Lithium-ion. Théoriquement, on peut aller plus loin dans l'autonomie en augmentant la quantité de batteries transportée. Cela se heurte cependant à des considérations de poids et d'économie. Il faut compter 3,8 kg de batterie au plomb pour déplacer de 1 km une tonne. Il faut prévoir dans le calcul le poids de la batterie elle-même. Il y a donc un moment à partir duquel cela augmente très vite. Par exem-

ple, si le poids du véhicule à transporter, hors batterie, est de 900 kg, dans le cas d'une autonomie de 100 km, on obtient un véhicule de 1,2 tonne dont 300 kg de batterie Nickel-Cadmium, ou 1,4 tonne dont 500 kg de batterie si celles-ci sont en plomb. Cela reste assez proche quelque soit la technologie. Par contre, pour une autonomie de 250 km, on est amené à prévoir un véhicule de 1,9 tonne dont une de batteries si celles-ci sont en NiCd, mais 3,6 tonnes dont 2.700 kg de batterie si celle-ci sont en plomb. En revanche, on pourra atteindre seulement 1,2 tonne dont 300 kg de batterie lorsque la technologie Lithium-ion sera disponible. Ainsi les masses de batterie divergent selon les technologies lorsque l'autonomie requise croit.

LE VÉHICULE HYBRIDE : UNE SOLUTION DE TRANSITION

Le véhicule électrique hybride est un véhicule qui associe les deux formes de traction : électrique pour les petits déplacements de l'ordre de un à plusieurs dizaines de kilomètres dans des zones sensibles (centre des villes par exemple), et à moteur thermique pour les longs trajets supérieurs à 50 ou 100 kilomètres, en particulier interurbains.

Cette définition a le mérite de bien situer la hiérarchie des autonomies qui sont apportées par l'une et l'autre des deux formes d'énergie. Pour le conducteur, les avantages apportés par le supplément d'autonomie que confère le carburant peuvent être décisifs :

1. Sécurité en cas d'utilisation sur des trajets à la limite de l'autonomie habituellement procurée par la batterie. Il lui suffit, en cas de panne de courant, de basculer sur le mode de moteur conventionnel (moteur thermique) pour achever tranquillement son parcours. Le conducteur n'a plus la crainte de tomber en panne.
2. Le véhicule hybride peut être utilisé sur deux modes différents : soit en traction électrique pure, analogue au véhicule électrique, avec tous les avantages liés à ce mode de traction, [pas de gaz d'échappement, pas de pollution, grande souplesse de conduite, voire même "effet de vitrine" que procure l'usage de ce

nouveau type de véhicule]. Soit, en mode moteur thermique : le conducteur retrouve alors une autonomie comparable à celle des véhicules conventionnels.

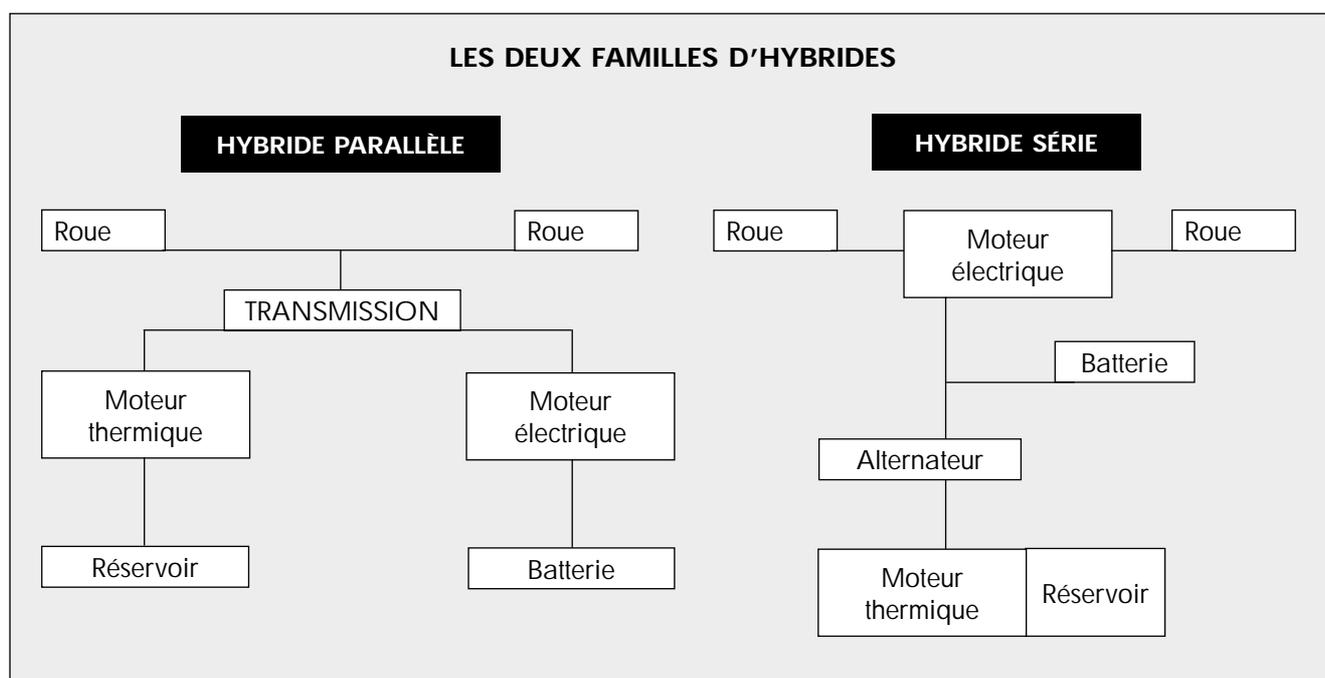
3. Durant les premières minutes, le moteur thermique peut être mis à profit pour chauffer l'habitacle.
4. Comme les effets de la pollution sont en fait surtout sensibles dans les villes, le conducteur aura intérêt (s'il n'y est même obligé, par des mesures de réglementation permanentes ou occasionnelles), à utiliser le mode électrique pour ses déplacements urbains.
5. Le véhicule électrique hybride peut être conçu, suivant deux arrangements internes différents : soit le moteur thermique est seulement utilisé, associé à un générateur électrique, pour produire l'électricité de recharge de la batterie : on parle alors d'un *montage en série*. Soit il est couplé mécaniquement aux essieux entraînant les roues et l'on parle alors d'un *montage parallèle*. (Voir le tableau n° 2).
6. L'avantage du « montage parallèle » est que les puissances du moteur électrique et du moteur thermique s'additionnent. On peut utiliser ce supplément de puissance pour faciliter le déplacement d'un camion sur autoroute par exemple.

7. Le « montage série » permet d'améliorer le rendement énergétique du moteur thermique car on peut le faire tourner à régime constant et optimiser son rendement. En fait, une partie du gain obtenu sur le moteur par son régime optimum est perdue par les rendements successifs du générateur, de la batterie et du moteur électrique, qui interviennent derrière ; si bien que le choix entre les deux solutions n'est pas tranché par avance. Il semble, d'un point de vue énergétique pur, que les gens qui roulent régulièrement sur autoroute aient plus intérêt dans la traction parallèle ; les autres, et en particuliers les

automobilistes à parcours essentiellement urbains ont plutôt intérêt, pour dépenser moins de carburant, à choisir la traction série, surtout s'ils peuvent utiliser de l'électricité sur réseau pour recharger leur batterie, car générer de l'électricité en utilisant le moteur thermique, (ce que l'on appelle le mode « range extender »), rend le kWh, et le km, très onéreux.

8. Il y a d'autres facteurs qui rentrent aussi en ligne de compte pour départager les deux solutions, comme les questions d'architecture de véhicule. Le véhicule hybride parallèle permet, en

Tableau n° 2



effet, une architecture très simple à l'intérieur des véhicules particuliers existants [en montant le moteur électrique directement sur l'essieu couplé avec le moteur traditionnel]. Cette solution est économique en investissement, car il s'agit d'une solution « mécano » qui réutilise les pièces actuelles ; elle est donc mieux adaptée aux exigences du marché (faible prix de revient). Par contre, pour les transports en

commun (bus électriques), la solution « série » permet une meilleure architecture de bus à plancher abaissé pour le confort des usagers.

9. Dans le cas du véhicule hybride, l'autonomie est apportée par le carburant et le dimensionnement de la batterie n'est en fait déterminée que par la puissance électrique strictement nécessaire à la traction du véhicule sur une dis-

tance réduite. On peut donc limiter, toujours dans l'exemple précédent, le poids de la batterie à 500 kg tout en conservant une autonomie comparable à celle d'un véhicule thermique.

Cela montre que **le véhicule hybride est la solution qui permet de dissocier le besoin d'autonomie du véhicule et le poids des batteries.**

10. A plus long terme, l'avantage du véhicule hybride sur le véhicule électrique s'estompe, mais cela est directement lié aux hypothèses faites sur les améliorations qui peuvent être espérées sur les batteries : réduction des masses, des coûts et augmentation des durées de vie. **La solution du véhicule hybride pourrait s'avérer être une solution de transition en attendant l'émergence des piles du futur (et des piles à combustibles).**

COMPARAISON DES SOLUTIONS ÉLECTRIQUES ET HYBRIDES ACTUELLES ET FUTURES

Une étude [22] réalisée par **Volvo** sur le marché américain (dans la perspective des lois sur la limitation des émissions de polluants par les véhicules), a fait la comparaison des solutions véhicule électrique et véhicule hybride en fonction de l'état de l'art des batteries actuelles et futures. Cette étude date de 1994. C'est la seule dont nous disposons pour l'instant. C'est

d'ailleurs pour combler cette lacune que le PREDIT a lancé récemment un logiciel de modélisation des véhicules électriques hybride collectifs en associant les organismes de recherche public (CIEVE, INRETS), et les industriels (ANF Industries, EDF, GEC Alsthom, LOHR, MATRA, PONTICELLI, RATP, RENAULT VI, SAFT).

I. Présentation des hypothèses

Nous ne rapporterons pas ici les équations qui ont servi au modèle sur lequel a été fondée l'étude. Il s'agit d'un modèle très classique et son exposé présenterait peu d'intérêt. Nous nous en tiendrons aux ré-

sultats qui comparent les différentes solutions technologiques sur la base d'un cahier des charges commun.

C'est ce cahier des charges qui est synthétisé dans le tableau ci-dessous (tableau n° 3) :

Tableau n° 3

CAHIER DES CHARGES IMPOSÉ AUX SOLUTIONS ÉLECTRIQUES OU HYBRIDES		
Solutions	Véhicule électrique	Véhicule hybride
Performances		
Autonomie totale	240 km	240 km
Autonomie « propre » en ville (sans moteur thermique)	identique à dessus	96 km
Vitesse maximale	136 km/h	
Vitesse sur pente 8 %	104 km/h	
Accélération de 0 à 100 km/h	12 secondes	
Accélération de 55 à 95 km/h	5,5 secondes	
Masse hors batteries et moteur conventionnel	916 kg	

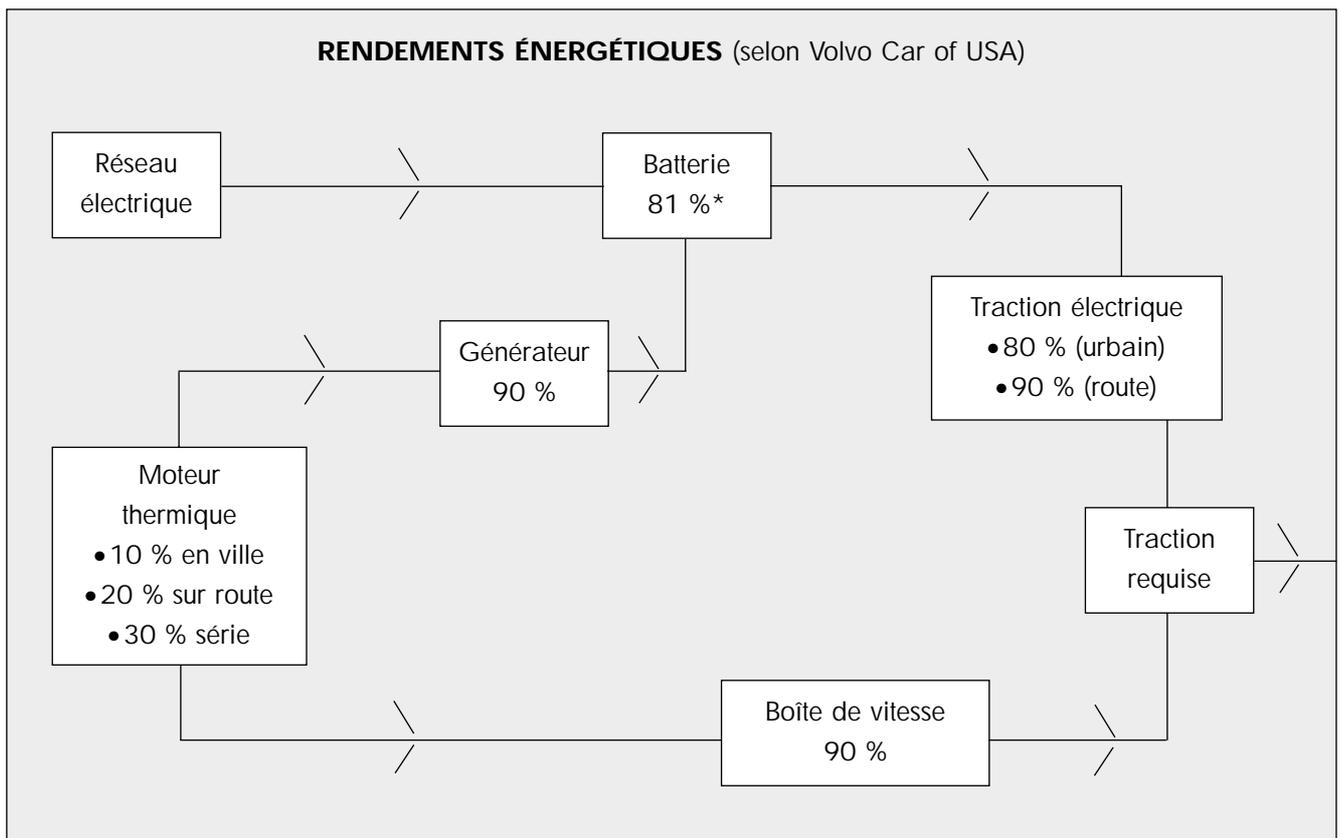
Source : Etude Volvo, 1994.

Il suggère les quelques explications suivantes :

- Le fait que la masse soit imposée hors batterie et moteur conventionnel s'explique par le fait que ces deux derniers composants résultent, en fait, des autres contraintes (autonomie requise...).
- Sur le concept "hybride", qui peut recouvrir une très grande diversité de solutions, les auteurs de l'étude ont choisi de dimensionner le moteur thermique pour que celui-ci ait trois fois la puissance nécessaire à la traction seule, de façon à ce que le véhicule puisse recharger au cours d'une mission de 240 km conçue comme suit :
 - ❖ Phase 1 : le véhicule, parti avec des batteries chargées par le réseau électrique, parcourt 96 km (60 miles) en mode électrique pur (par exemple, en usage urbain).

- ❖ Phase 2 : le véhicule parcourt 48 km (30 miles) en mode thermique avec recharge des batteries par le moteur thermique (par exemple, sur autoroute) : au bout de ces 48 km, les batteries sont à nouveau chargées.
- ❖ Phase 3 : le véhicule parcourt 96 km (60 miles) en mode électrique pur.
- D'autre part, cette étude est partie d'hypothèses sur les **rendements énergétiques** et les performances des batteries qui sont essentielles pour la comparaison des solutions. Ces hypothèses apparaissent dans les tableaux n° 4 et 5.
- Les performances techniques des batteries qui sont rappelées dans (le tableau n° 5) sont connues et devraient être indiscutables. Cependant, les progrès techniques aidant, elles devront probablement être révisées. Remarquons

Tableau n° 4



* Il s'agit du rapport de l'énergie sortante sur l'énergie entrante dans la batterie.

ainsi que l'hypothèse prise pour l'énergie massique de la batterie NiCd dans le pire des cas est identique à celle des batteries plomb, ce qui paraît bien pessimiste. Il en est aussi ainsi pour les écarts de coûts entre les batteries au plomb et les autres... L'écart entre les solutions NiCd et NiMH, très proches sur le plan électrochimique, nous paraît élevé. Pour le futur, l'étude paraît bien optimiste. La technologie des batteries plomb est tout de même ancienne et ne laisse pas espérer de pro-

grès techniques aussi spectaculaires à moyen terme et dans tous les domaines

- Les hypothèses prises par Volvo pour les performances des batteries diffèrent ainsi de celles admises en général par les industriels français qui correspondent au (tableau n° 1). On peut regretter que Volvo ait pris des hypothèses si défavorables pour les batteries Nickel-Cadmium qui, dans le cas pessimiste, sont ramenées aux performances de la bat-

Tableau n° 5

PERFORMANCES DES BATTERIES (selon Volvo Car of USA)			
Type de batterie	Etat de l'art actuel		Etat futur
Energie massique (Wh/kg)	pire des cas	meilleur des cas	
Plomb	30	40	50
NiCd	30	50	57
NiMH	60	80	120
Puissance spécifique (W/kg)			
Plomb	200	200	300
NiCd	150	200	200
NiMH	100	200	220
Coût spécifique (F/kWh)			
Plomb	750	500	260
NiCd	4250	2800	570
NiMH	3550	2800	600
Durée de vie (nombre de cycles à 80 % DOD)			
Plomb	300	600	900
NiCd	1000	1500	1650
NiMH	1000	2000	2200

terie plomb avec des coûts exorbitants. Inversement, les hypothèses prises pour l'état futur, et notamment celles sur l'abaissement des coûts, sont optimistes : elles résultent de la prise en compte d'un coût « matière première » de 65 F/kWh pour le plomb, de 390 F/kWh pour le NiCd et de 416 F/kWh pour le NiMH [auquel s'ajoute un coût de main-d'œuvre de 180 F/kWh dans tous les cas] ce qui généralise les résultats obtenus avec la production en série des batteries au plomb de démarrage. Cela suppose, que le véhicule élec-

trique occupe une part relativement importante du marché de la voiture, ce qui n'est pas envisageable à un horizon très proche. Il en va de même pour l'allongement espéré des durées de vie qu'il est prévu de doubler ou tripler dans le cas des batteries au plomb.

Chacun de ces progrès techniques pris isolément est possible. Cependant, on peut s'interroger sur la possibilité d'atteindre **simultanément** les améliorations de performances et de durée de vie, et les baisses de coûts attendus dans les batteries futures.

II. Les résultats techniques

Les caractéristiques techniques comparées des véhicules électriques et hybrides envisageables sont résumés dans le tableau n° 6. Il convient de rappeler qu'ils dépendent largement des hypothèses prises pour le calcul, hypothèses que nous avons critiquées précédemment.

On voit apparaître à ce stade **l'avantage considérable, en allègement du véhicule et en prix des batteries, apporté par le véhicule hybride dans la situation actuelle.** Cela résulte de ce que le véhicule hybride permet de dissocier les problèmes du dimensionnement des

Tableau n° 6

COMPARAISON DES PERFORMANCES TECHNIQUES DES VÉHICULES ÉLECTRIQUES ET HYBRIDES (selon Volvo Car USA)						
	VE actuel		VE futur	VH actuel		VH futur
	Pire des cas	Meilleur des cas		Pire des cas	Meilleur des cas	
Poids de la batterie						
Poids de la batterie Pb (kg)	3018	1639	1125	659	458	350
Poids de la batterie NiCd (kg)	3018	1125	973	659	489	330
Poids de la batterie NiMH (kg)	857	580	352	916	334	300
Prix de la batterie						
Prix de la batterie Pb (kF)	74,7	36	14	16,32	10	4,5
Prix de la batterie NiCd (kF)	373	139	28	81,4	60,5	10
Prix de la batterie NiMH (kF)	176,7	114,8	24	176,7	66	20
Poids total du véhicule						
Poids véhicule avec bat. Pb (kg)	4054	2675	2160	1780	1580	1480
Poids véhicule av. bat. NiCd (kg)	4054	2161	1960	1784	1614	1460
Poids véhicule av. bat. NiMH (kg)	1892	1615	1390	2041	1460	1420

batteries et de l'autonomie. Dans le cas de véhicule électrique le poids et le prix des batteries sont directement déterminés par l'autonomie désirée alors que pour le véhicule hybride cette autonomie est apportée par le carburant. **Pour le futur,**

compte tenu du progrès des batteries espéré par les auteurs de l'étude, qui permet de réduire leur dimensionnement d'un facteur 3, l'avantage de la solution hybride s'estompe.

III. Les résultats énergétiques

Comme on le voit dans le (tableau n° 7, les consommations énergétiques font apparaître des diminutions qui peuvent être déterminantes pour les problèmes d'environnement et de développement durables. Compte tenu des progrès techniques effectués par les constructeurs pour rendre leurs véhicules moins polluants, les diminutions obtenues sont surtout intéressantes vis-à-vis de l'effet de serre. Il est peu probable cependant que le consommateur soit sensible à cet argument : ce qui peut, en revanche, l'intéresser, c'est l'impact sur le coût du kilomètre parcouru.

Les consommations en carburant du véhicule hybride paraissent élevées, surtout dans la version parallèle. Dans tous les cas, il s'agit de la consommation obtenue selon l'utilisation théorique, [quand on parcourt 240 km en faisant marcher le moteur thermique pour recharger les batteries sur un cinquième du parcours total]. En pratique, il est possible de circuler uniquement en mode électrique pour la majorité des déplacements qui font moins de 95 km aller et retour, et de n'utiliser le mode hybride que dans le cas de longs parcours.

Tableau n° 7

COMPARAISON DES CONSOMMATIONS ÉNERGÉTIQUES (selon Volvo Cars of USA)						
	VE actuel		VE futur	VH actuel		VH futur
	Pire des cas	Meilleur des cas		Pire des cas	Meilleur des cas	
Cons. Wh/km avec batterie Pb	372	270	231	204	189	181
Cons. Wh/km avec la batte. NiCd	372	231	216	204	191	179
Cons. Wh/km avec batte. NiMH	211	191	174	222	179	176
Cons. de carburant pour 100 km avec VH série et batterie Pb en 1	néant	néant	néant	7,86	7,28	6,94
Cons. de carburant pour 100 km avec VH parallèle et batterie Pb en 1	néant	néant	néant	14	13	12,46
Cons. de carburant pour 100 km avec VH série et batterie NiCd en 1	néant	néant	néant	7,86	7,37	6,92
Cons. de carburant pour 100 km avec VH parallèle et bat. NiCd en 1	néant	néant	néant	14,1	13,1	12,4
Cons. de carburant pour 100 km avec VH série et batterie NiMH en 1	néant	néant	néant	7,86	6,92	6,78
Cons. de carburant pour 100 km avec VH parallèle et bat. NiMH en 1	néant	néant	néant	15,4	12,4	12,2

- Dans l'étude faite par Volvo, la comparaison des variantes véhicule hybride "série" et "parallèle" se fait à l'avantage de la solution série : cela résulte de l'augmentation considérable du rendement du moteur thermique, exploité au maximum (30 %), et qui est considérablement supérieur aux rendements supposés de la solution parallèle (20 % sur autoroute et 10 % en ville). Ces rendements supposés sont en fait très dépendants à la fois du comportement plus ou moins agressif des conducteurs et de la nature de leurs trajets : urbains, rase campagne, autoroute. En fait, il y a

une multitude de conducteurs particulier qui auront chacun leur rendement spécifique. Il faut donc faire attention avant de condamner l'une de deux solutions. D'autres part, d'autres considérations pourront entrer en ligne de compte dans le choix de la solution qui s'imposera. En particulier, les considérations de fiabilité : le véhicule électrique, ou hybride, devra pouvoir être utilisé par des conducteurs qui ne connaissent pas nécessairement toutes les précautions qu'il convient de prendre, notamment dans l'utilisation des batteries.

IV. Les résultats économiques

Ils apparaissent dans le (tableau n° 8). Les coûts par kilomètre des batteries sont fonction de leur durée de vie. Les coûts combinés électricité + batterie, en mode tout électrique, intègrent le prix du kWh vendu en

Californie, (0,34 F/kWh). Le kWh d'Electricité de France devrait être encore moins élevé – avec un coût moyen sensiblement égal à 8 centimes par kilomètre x tonne transportée.

Tableau n° 8

COMPARAISON DES COÛTS ÉCONOMIQUES (selon Volvo Cars of USA)							
Coût	Hypothèses	VE actuel		VE futur	VH actuel		VH futur
		Pire des cas	Meilleur des cas		Pire des cas	Meilleur des cas	
Coût F/km du a la batterie Pb		1,04	0,25	0,07	0,57	0,18	0,05
Coût F/km du a la batterie NiCd		1,55	0,39	0,07	0,85	0,32	0,06
Coût F/km du a la batterie NiMH		0,81	0,24	0,05	0,77	0,22	0,05
Coût combiné électricité + batterie F/km avec batterie Pb en mode tout élect.		1,17	0,34	0,14	0,64	0,24	0,11
Coût combiné électricité + batterie F/km avec batterie NiCd en mode tout élect.		1,69	0,47	0,14	0,92	0,39	0,12
Coût combiné électricité + batterie F/km avec batterie NiMH en mode tout élect.		0,91	0,31	0,10	0,86	0,29	0,10

V. Evaluations tenant compte d'hypothèses plus réalistes

Les coûts estimés par Volvo apparaissent assez réalistes pour le présent, mais encore trop optimistes pour le futur, car les évaluations sont fondées sur des hypothèses d'abaissement du prix des batteries et d'amélioration de leurs performances qui seront très difficiles à atteindre.

Nous nous sommes donc livrés à l'exercice qui consiste à répartir des hypothèses du (tableau n° 1) qui nous paraissent plus réalistes soit pour le présent (elles correspondent mieux aux technologies actuelles et tiennent compte en tout cas de l'état

de l'art français), soit parce qu'elles se rapprochent le plus possible du consensus sur les performances des technologies futures.

Les résultats obtenus sont exposés dans le (tableau n° 9). Ils reposent sur le même cahier des charges que celui utilisé par Volvo. Nous avons du effectuer un certain nombre de corrections pour tenir compte des nouvelles valeurs, actuelles et futures, de l'énergie massique, de la puissance massique, du coût spécifique et de la durée de vie (voir encart n° 1).

Méthodes de calcul utilisées pour corriger les hypothèses de l'étude Volvo

- Dans le cas des véhicules électriques, les poids des batteries sont interpolables pour les batteries de la même technologie en fonction des énergies massiques, à partir des valeurs les plus proches (en effet, nous avons vu que la relation n'est pas inversement proportionnelle, compte tenu de l'effet rétro-actif du poids des batteries sur les besoins énergétiques).
- Dans le cas des véhicules hybrides, les poids sont interpolables en fonction des inverses des puissances lorsque celle-ci devient le facteur dimensionnant (cas des batteries Ni-Cadmium).
- Les prix des batteries sont proportionnels aux produits du coût spécifique du kWh dans une technologie donnée par l'énergie requise selon la solution hybride ou électrique, éventuellement cette énergie est déterminée par la puissance requise dans la version hybride.
- Les coûts des batteries sont calculés de la manière suivante : le véhicule, compte tenu de la longévité des composants, est supposé durer 150.000 km. Pour les véhicules électriques les batteries Plomb, compte tenu de leur faible durée de vie sont remplacées une fois, les batteries Nickel-Cadmium ou Lithium-Ion, ne sont pas remplacées. Pour les hybrides, les batteries Nickel-Cadmium ou Lithium-Ion ne sont pas non plus remplacées durant la vie du véhicule. Le coût d'amortissement de la batterie plomb a été calculé en rapportant le prix de la batterie au kilométrage résultant du produit des 96 km d'autonomie en mode électrique par le nombre de cycles admis de la durée de vie. Ce dernier point est important car, contrairement au calcul effectué par Volvo, le coût d'amortissement de la batterie Plomb est plus élevée que celui de la batterie Nickel-Cadmium.
- Nous avons supposé, comme Volvo, que le dimensionnement global du moteur thermique était de trois fois la valeur nécessaire au strict maintien en charge de la batterie. Cela permet d'utiliser assez fréquemment le véhicule hybride en mode électrique, pour lui conserver son intérêt écologique. Il s'agit d'une hypothèse de travail, et non d'une recommandation de dimensionnement respectif des moteurs thermiques et électriques.
- Les consommations moyennes ont été calculées sur la base d'un profil de mission identique à celui de Volvo, soit 96 kms en tout électrique, puis 48 km avec fonctionnement du moteur thermique, puis à nouveau 96 km en électrique pur. Ce profil correspond bien au dimensionnement respectif des parties thermique et électrique de l'hybride.
- Nous sommes partis d'un prix du litre de gasoil de 4,5 F (en cas d'utilisation en mode « range extender » des véhicules hybrides).
- Les coûts en mode « range extender » sont identiques en ville ou sur autoroute pour les versions hybrides séries, mais ces coûts sont différents pour les versions hybrides parallèles. Les consommations de carburants et les coûts obtenus en ville avec ce mode sont beaucoup plus élevés. Cependant, on peut supposer que le conducteur s'arrangera pour utiliser le mode « range extender » sur autoroute, et le mode tout électrique à partir du réseau en ville.
- Pour les véhicules hybrides, nous avons calculé les consommations obtenues en utilisant le mode thermique en ville avec les solutions hybrides série et hybrides parallèles, même si cela n'est pas a priori la solution écologique, mais simplement parce que l'utilisateur peut y être obligé dans certaines situations de faibles charges de ses batteries.
- Nous avons distingué le mode électrique à partir du réseau et le mode électrique avec recharge à partir du moteur thermique (« range extender »), en ville et sur autoroute pour calculer les consommations.
- Nous avons supposé que dans l'hybride série, le rendement de la batterie intervenait systématiquement en ville raison de la variation des régimes de puissances requises, le moteur thermique étant lui à régime constant tandis que sur autoroute, durant un tiers du parcours, l'ensemble moteur thermique – générateur alimente directement le moteur électrique sans passer par la batterie.

Tableau n° 9

COMPARAISON DES SOLUTIONS ÉLECTRIQUE/HYBRIDE APRÈS CORRECTION DES HYPOTHÈSES			
	Véhicule électrique	Hybride Série	Hybride parallèle
Poids de la batterie Plomb (kg)	2328	559	559
Poids de la batterie NiCd (kg)	1125	489	489
Poids de la batterie Li-Ion (futur) (kg)	360	137	137
Poids du véhicule avec batterie Pb (kg)	3363	1684	1684
Poids du véhicule avec batterie NiCd (kg)	2160	1614	1614
Poids du véhicule avec batterie Li-Ion (kg)	1395	1262	1262
Prix de la batterie Plomb (F)	78.330	19.300	19.300
Prix de la batterie NiCd (F)	167.100	73.350	73.350
Prix de la batterie Li-Ion (futur) (F)	70.200	26.700	26.700
Coût en F/km du à la batterie Plomb	1,57	0,57	0,57
Coût en F/km du à la batterie NiCd	1,11	0,49	0,49
Coût en F/km du à la batterie Li-Ion	0,47	0,18	0,18
Coût combiné électricité + batterie Pb en mode tout électrique à partir du réseau	1,84	0,70	0,70
Coût combiné électricité + batterie NiCd en mode tout électrique à partir du réseau	1,28	0,62	0,62
Coût combiné électricité + batterie Li-Ion en mode tout électrique à partir du réseau	0,58	0,28	0,28
Coût en F/km en mode « thermique » des hybrides équipés de batterie Plomb		0,89	0,93 (1,19 en ville)
Coût en mode « thermique » des hybrides équipés de batterie NiCd		0,79	0,84 (1,09 en ville)
Coût en mode « thermique » des hybrides équipés de batterie Li-Ion		0,42	0,45 (0,65 en ville)

Source : Y. Tugayé, CPVS.

Principales conclusions

1. Les solutions de véhicules électriques sont très dépendantes du type de batterie et la solution batterie plomb ne paraît pas compétitive, pour des raisons de poids, d'encombrement et de coût d'amortissement par rapport aux autres solutions.

2. La batterie Nickel-Cadmium ne semble pas compétitive elle non plus, en raison essentiellement, du coût d'achat de la batterie.

Cependant, nous avons supposé que le véhicule était utilisé seulement 150.000 km. La longévité de la pile Nickel-Cadmium permet d'aller beaucoup plus loin (sauf défaillance particulière). Dans le véhicule électrique, la batterie Nickel-Cadmium est de toute façon plus compétitive que la batterie plomb, mais il faut faire plus de 300.000 km pour que la batterie Nickel-Cadmium devienne comparable à la batterie Lithium-Ion.

Tableau n° 10

Comparaison des consommations en carburant des hybrides selon la batterie et l'usage (nouvelles hypothèses)		
	Hybride série	Hybride parallèle
Consommation totale moyenne de carburant 1/100 en mode hybride utilisé en ville avec batterie Pb	10,1	13,8
Consommation totale moyenne de carburant 1/100 en mode hybride utilisé en ville avec batterie Ni-Cd	9,8	13,4
Consommation totale moyenne de carburant 1/100 en mode hybride utilisé en ville avec batterie Li-Ion	7,7	10,5
Consommation totale moyenne de carburant 1/100 en mode hybride sur « autoroute » avec batterie Pb	9,4	8,0
Consommation totale moyenne de carburant 1/100 en mode hybride « sur autoroute » avec batterie NiCd	9,1	7,7
Consommation totale moyenne de carburant 1/100 en mode hybride « sur autoroute » avec batterie Li-Ion	7,2	6,1
Consommation momentanée de carburant 1/100 en mode recharge thermique en ville avec batterie Pb	29,2	56,6
Consommation momentanée de carburant 1/100 en mode recharge par le thermique en ville avec batterie NiCd	28,3	54,8
Consommation momentanée de carburant 1/100 en mode recharge par le thermique avec batterie Li-Ion	22,3	43,4
Consommation momentanée de carburant 1/100 en mode recharge thermique sur autoroute avec batterie Pb	29,2	24,9
Consommation momentanée de carburant 1/100 en mode recharge thermique sur autoroute avec batterie NiCd	28,3	24,1
Consommation momentanée de carburant 1/100 en mode recharge sur autoroute avec batterie Li-Ion	22,3	19,0

3. Pour le véhicule hybride, la batterie plomb n'est également pas compétitive, mais elle se rapproche des autres solutions. Les solutions hybrides conduisent à une certaine convergence des coûts quelque soit la batterie.
4. Les solutions hybrides, bien que non conçues a priori pour cela, sont systématiquement moins consommatrices d'énergie que les solutions électriques, pour un usage électrique à partir du réseau.
5. Les solutions hybrides sont relativement indifférentes au type de batterie utilisée, et même la solution batterie plomb ne paraît pas nécessairement désuète pour les versions hybrides.
6. La solution Lithium-Ion est la seule qui permette à la solution électrique de se rapprocher, en poids, en encombrement et en coût, des solutions hybrides.
7. La consommation de l'hybride série est relativement indifférente au

fait que l'on soit en ville, sur route ou autoroute. Elle est relativement indifférente aux erreurs de gestion de son mode énergétique : thermique, ou électrique, ou « range extendeur ». Cela peut constituer un avantage de souplesse ou de liberté pour certains utilisateurs qui ne veulent pas avoir à organiser leur choix de mode énergétique.

Tout ceci montre que le véhicule hybride est une solution immédiate qui pourrait permettre d'anticiper l'avènement de la batterie Lithium-Ion, laquelle ne sera probablement pas disponible avant l'an 2000. Mais il ne faut pas la voir uniquement comme solution transitoire car même avec la pile Lithium-Ion, la solution hybride reste moins lourde et plus économique en énergie que la solution électrique. Cela ne veut pas nécessairement dire que, pour autant, le véhicule électrique soit condamné car il présentera l'avantage d'un moindre coût à l'achat de la voiture, notamment si on le compare à l'hybride série. Ce sera le calcul de rentabilité en fonction de l'usage effectué qui tranchera.

Choix entre la solution hybride série et la solution hybride parallèle

Le choix entre la solution hybride série et la solution hybride parallèle dépend essentiellement de l'usage plus ou moins urbain, plus ou moins autoroutier du véhicule. Nous avons voulu voir quels seraient, en fonction de ces deux usages, les kilométrages nécessaires pour justifier la différence de prix à l'achat entre les deux types d'hybrides. Nous avons supposé que la différence de prix entre le véhicule hybride parallèle et le véhicule hybride série était de 30.000 F. Il s'agit d'une hypothèse. Dans la réalité, les prix dépendent étroitement des séries de production, et il est très difficile de se prononcer avant que les marchés

ne se soient constitués. Cette hypothèse est en fait une moyenne entre l'état actuel (différence plus élevée) et ce qui pourrait résulter d'une percée à terme des véhicules hybrides série, permettant un abaissement du coûts de l'architecture véhicule et des composants.

Ces données tendent à prouver qu'il y a un marché spécifique pour le véhicule urbain hybride série équipé d'une batterie Nickel-Cadmium, et qu'une utilisation essentiellement hors ville justifie de choisir dans tous les cas la solution hybride parallèle.

Tableau n° 11

Kilométrage nécessaire pour justifier la solution hybride série par rapport à la solution parallèle				
Utilisation	Utilisation essentielle en ville	Utilisation 2/3 en ville 1/3 sur route	Utilisation 1/3 en ville et 2/3 sur route	essentielle sur route
Type d'hybride				
Hybride équipé d'une batterie Plomb	100.000	130.000	240.000	750.000
Hybride équipé d'une batterie Nickel-Cadmium	75.000	105.900	180.000	600.000
Hybride équipé d'une batterie Lithium-Ion	130.400	183.700	230.800	1.000.000

VI. Quel marché pour le véhicule électrique (hybride ou non) ?

Quelles que soient les solutions adoptées et les progrès techniques réalisés dans les années à venir, il apparaît inconcevable que le véhicule électrique puisse reprendre – dans toute son étendue – le marché de la voiture traditionnelle. Il y a plusieurs raisons à cela : le coût du véhicule électrique est encore supérieur de 15 % à 30 % à celui d'une voiture traditionnelle de même habitabilité et de performances comparables. Pour le véhicule hybride parallèle, le surcoût est du même ordre. Pour le véhicule hybride série, il est plus élevé encore (de 25 % à 50 %). Certes, le coût d'usage (kilomètre roulant) est moindre dans le cas du véhicule électrique (hybride ou non). Mais le coût glo-

bal pour l'utilisateur ne peut être favorable au véhicule électrique par rapport au véhicule traditionnel, que dans certaines situations très spécifiques.

Il y a également les contraintes d'autonomie qui conduisent à réserver l'usage du véhicule électrique aux petits déplacements urbains ou domicile travail. Tout le monde reconnaît donc aujourd'hui que le véhicule électrique ne pourra pénétrer le marché dans sa totalité, mais pour des usages spécifiques. D'ailleurs, les ventes de véhicule électrique en France, comme dans les autres pays, ont été extrêmement limitées même si elles augmentent depuis deux ans.

Les ventes de (93 à 97) véhicule électrique en France	
1993	296
1994	230
1995	330
1996	1304
1997 (1er semestre)	306

Source : Groupement interministériel du véhicule électrique (1997).

En France, le PREDIT (Programme de Recherche et de Développement des Industries du Transport) s'est préoccupé de déterminer quelles étaient les niches du marché automobile qui pouvaient être les plus propices à l'utilisation des véhicules électriques ou hybrides en déterminant là où il y avait convergence entre les évolutions technologiques, et les besoins du marché. La considération de ces contraintes d'ordre technique, économique et d'usage ont conduit l'intergroupe chargé du sujet des véhicules électriques du PREDIT, sous la direction de M. Prost-Dame, à identifier cinq marchés spécifiques (voir le tableau n° 12). On peut établir une comparaison des coûts d'achat et d'exploitation

pour le véhicule électrique et thermique. Le véhicule électrique est plus coûteux en investissement, mais plus économique en exploitation, du moins à partir de 5000 km par an. Cela constaté, on peut calculer en fonction du kilométrage moyen journalier (ou annuel, sur la base de 220 jours ouvrés par an) le **décalage de recouvrement**, c'est-à-dire le nombre d'années nécessaires à la récupération du surcoût de l'investissement initial. Ceci figure dans le (tableau n° 12). On voit clairement apparaître la forte relation entre la catégorie d'usage (véhicule utilitaire avec récupération de la TVA ou véhicule de tourisme, sans récupération, kilométrage journalier) et la rentabilité du véhicule électrique.

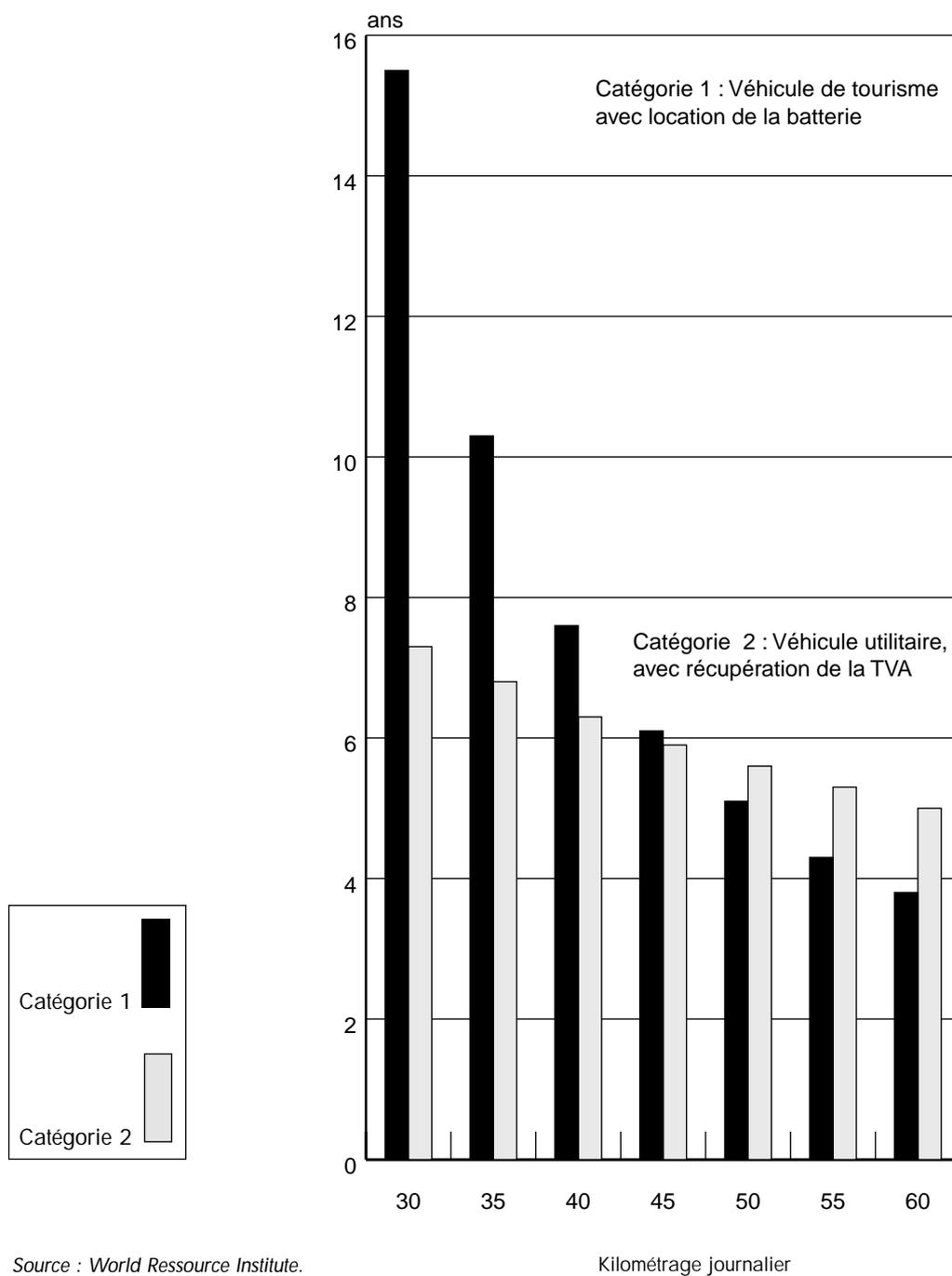
Les marchés du véhicule électrique identifiés par le PREDIT

1. Le petit véhicule spécifiquement électrique pour un usage spécifiquement urbain ou domicile-travail basé, par exemple sur la conception du modèle Tulip, où l'on valorise la conception totalement nouvelle de la voiture en lui faisant prendre une niche totalement spécifique (très petite voiture urbaine, à la limite de la voiture « Swatch ») en dehors du marché actuel de la voiture traditionnelle. L'autonomie est limitée aux environs de 50 à 100 km. Cet handicap n'est pas aussi grand qu'il n'y paraît. Une étude [15] réalisée par l'Institut des Etudes de Transport aux Etats-Unis révèle que dans le cas de ménages « hybrides » (il s'agit cette fois de ménages équipés à la fois d'un véhicule traditionnel et d'un véhicule électrique), la faible autonomie n'est pas un handicap majeur grâce au fait que le ménage se répartit ses véhicules en fonction des déplacements à effectuer. Ce marché ne convient au véhicule hybride que si l'on dispose d'un moteur thermique de très petite taille, ce qui exige de sortir des moteurs traditionnels de l'automobile.
2. Le véhicule électrique obtenu à partir d'une base « voiture existante » (pour des considérations de coûts d'investissement industriel), qui peut être soit un véhicule électrique « léger » à autonomie limitée, soit un véhicule électrique « lourd » avec augmentation de l'autonomie au détriment du poids total et du volume utile, mais sans que celle-ci atteigne le niveau des voitures traditionnelles. Cette solution correspond grossomodo aux véhicules électriques actuels, de Renault et PSA, déjà proposés sur le marché. Elle intéresse principalement les flottes (loueurs d'automobiles, Postes, Electricité de France,...
3. Le véhicule électrique hybride obtenu à partir d'une base « voiture haut de gamme » qui peut être un véhicule hybride parallèle dans laquelle on diminue la taille du moteur thermique pour y loger le moteur électrique sur le même arbre d'entraînement, ce qui permet une architecture simple et le meilleur emploi en base du moteur thermique, le moteur électrique, associé à des supercapacités ou, sous les réserves déjà faites, un dispositif inertiel, fournissant la pointe.
4. Le véhicule de transport de marchandises appartenant à une « flotte » qui peut être soit un véhicule électrique pour des déplacements toujours courts, soit un hybride lorsque l'on prévoit des déplacements longs occasionnels. L'intérêt principal serait de pouvoir pénétrer dans les centres-villes en préservant l'environnement et aussi de pouvoir livrer la nuit sans réveiller les citadins (voir l'exemple anglais des véhicules électriques livrant le lait le matin).
5. Le véhicule de transport en commun qui peut être soit un tramway, rendu véhicule électrique autonome pour le centre-ville, soit un véhicule hybride avec moteur diesel pour générer la puissance de base et le chauffage. L'absence dans certains sites urbains d'infrastructures d'alimentation électriques par fils qui ne sont pas particulièrement esthétiques et qui ne sont pas nécessaires pour le véhicule hybride est un gros avantage. Le véhicule électrique "pur" ne permet pas une autonomie suffisante sans fils sauf à se pénaliser par le poids et le prix des batteries. Le véhicule électrique peut utilement être un hybride série pour permettre un plancher bas avec les nouvelles technologies de moteurs électriques ramenés aux roues, ce qui constitue un élément de confort pour les personnes âgées, fraction de plus en plus importante de notre société.

Signalons le marché de la benne à ordures ménagères, déjà existant pour la benne électrique et particulièrement adapté dans le futur au véhicule hybride qui peut être à la fois silencieux dans les villes, et parcourir la distance nécessaire jusqu'à la décharge de plus en plus éloignée des villes.

Tableau n° 12

Délai de recouvrement du surcoût du véhicule électrique en fonction du kilométrage journalier parcouru



L'HYDROGÈNE ET LES PILES À COMBUSTIBLES

Comme on l'a déjà évoqué, l'une des variantes du véhicule électrique, qui permet, tout comme le véhicule hybride, de s'affranchir des limites de l'autonomie, est l'uti-

lisation de piles à combustibles fonctionnant avec de l'hydrogène. C'est une solution qui suscite aujourd'hui de plus en plus d'intérêt.

I. Avantages et inconvénients liés à l'emploi de l'hydrogène

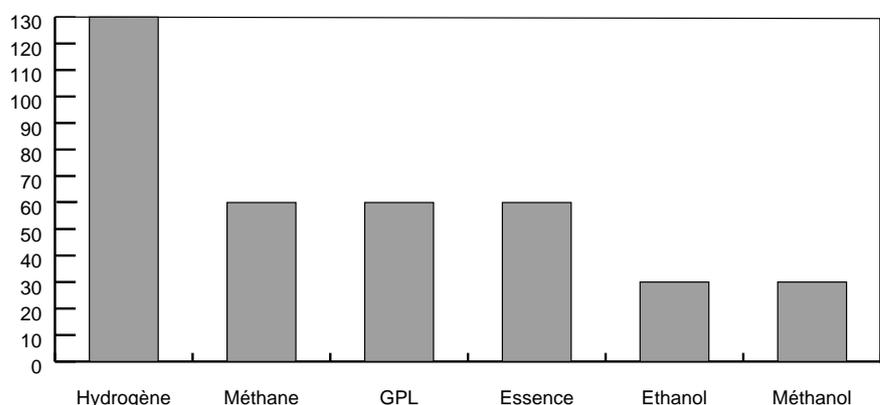
L'hydrogène n'est pas disponible comme ressource à l'état naturel. Il est nécessaire de le produire par conversion à partir d'une autre source (reformage du gaz naturel, électrolyse de l'eau,...). Son intérêt pour les véhicules électrique est qu'il constitue une forme d'énergie intermédiaire qui peut être utilisée pour produire sans pollution de l'électricité avec les piles à combustibles.

Mais selon qu'on le produit à partir d'une énergie primaire tel que le gaz naturel ou l'essence (par reformage) ou l'électricité (d'origine nu-

cléaire en France), les bilans énergétiques, environnementalistes, ou économiques peuvent différer notablement. D'autre part, l'hydrogène n'est pas facile à stocker sur un véhicule : ses performances excellentes en termes d'énergie massique s'effondrent quand on raisonne en termes d'énergie volumique, même à l'état fortement comprimé (160 bars, ce qui pose un problème de sécurité et d'infrastructure), sauf à employer la voie cryogénique (celle de l'hydrogène liquide, sous pression normale, mais à extrêmement basse température : - 253 °C. (Voir les tableaux n° 13 et 14).

Tableau n° 13

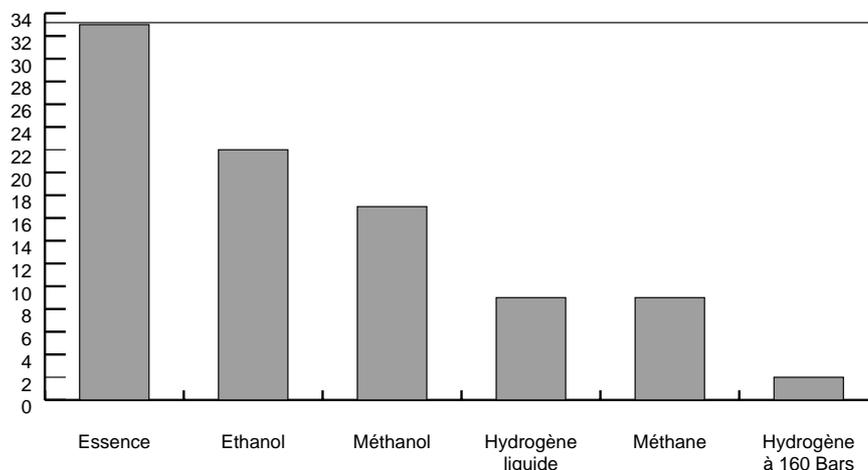
Energie massique de différents carburants (Millions de BTU* par kg)



Source : World Ressource Institute.

Tableau n° 14

Energie volumique des mêmes carburants (Millions de BTU par m³)



II. Les piles à combustibles

Pour dissocier de manière élégante le problème de la traction électrique du stockage de l'énergie, beaucoup de constructeurs automobiles effectuent des travaux de recherche sur l'utilisation des piles à combustibles, technologie spatiale, dans les véhicules. Cependant, la pile à combustible par elle-même ne résout pas le problème du stockage du combustible qui reste extérieur à la pile et qui est de l'hydrogène. Pour assurer cette fonction « réservoir d'énergie », plusieurs filières sont possibles :

- soit l'on stocke l'hydrogène sous haute pression (plusieurs centaines de bars), mais cela pose les problèmes de logistique au niveau du réseau de distribution qui n'existe pas, et de sécurité [problème des gazs sous haute pression lorsqu'ils sont stockés ou embarqués] ;
- soit l'on stocke l'hydrogène sous forme liquide, à très basse température (en dessous de - 200°C). Mais cela pose - outre les mêmes problèmes de distribution - ceux de la mécanique cryogénique. Celle-ci est une technologie de pointe qui exige des usinages de très haute précision, et des matériaux résistants aux très fortes variations de température, [sans oublier qu'aucun graissage n'est possible et qu'aucune pollution n'est autorisée] ;
- soit l'on fabrique l'hydrogène par reformage à partir d'une autre forme

d'énergie (méthanol, essence), mais cela pose le problème de l'épuration des gaz produits par le reformage : il faut éliminer le monoxyde CO en l'oxydant en CO₂, filtrer le CO₂, régénérer périodiquement les catalyseurs nécessaires pour cela. Il faut parfois en aval de la pile à combustibles une batterie tampon pour faire face au démarrage et aux variations de charge. L'avantage énergétique et économique dans le bilan d'ensemble n'est pas garanti. Les coûts sont encore « importants » même si l'on prévoit leur baisse à long terme. Néanmoins, cette filière a l'immense avantage de pouvoir s'appuyer sur le réseau logistique des stations d'essence actuelles.

Quelque soit la voie qui sera choisie, il faut bien distinguer les problèmes de coûts de ces différentes techniques [les coûts sont très compressibles sur des technologies nouvelles à condition de consacrer du temps et de l'argent], et ceux durement énergétique (ceux-ci résultent des lois de la physique et sont en général des obstacles incontournables). Si au départ, une technologie offre un rendement énergétique global du même ordre ou un peu supérieur à celui des meilleurs moteurs thermiques du futur, elle a bien peu de chance de s'imposer.

Compte tenu de toutes ces difficultés, tout le monde reconnaît que ces technologies sont une solution à long terme qui ne pourrait être mise sur le marché avant 2010-2015.

LES EXPÉRIENCES NATIONALES DE DÉVELOPPEMENT DU VÉHICULE ÉLECTRIQUE

Les expériences en faveur du véhicule électrique ou hybride diffèrent considérablement d'un pays à

l'autre. Cela est du le plus souvent à des facteurs historiques et industriels spécifiques.

I. En France

En France, l'effort de recherche et de développement en faveur du véhicule électrique ne correspond pas à un engouement récent, mais résulte d'une longue et patiente collaboration entre les Pouvoirs Publics et les Industriels. Il faut dire que la France, avec 75 % de son électricité produite par son parc électronucléaire, dispose à travers le véhicule électrique d'une possibilité de lutter contre l'effet de serre qui n'est pas ouverte dans la même proportion aux autres pays. (même si le nucléaire pose, par ailleurs d'autres problèmes d'environnement) La France est le premier pays à avoir produit des véhicules électriques de série proposés sur le marché à des prix comparables (hors batterie) avec le véhicule traditionnel. Ce sont la Clio électrique, et l'Express électrique de Renault, et du côté de PSA, la Saxo-électrique de Citroën, et la 106 Electrique de Peugeot. Tous ces véhicules sont équipés de batteries SAFT au Nickel-Cadmium, donc d'une longue durée de vie, et ont une autonomie de l'ordre de 80 km. Les recherches continuent activement sur les piles au Lithium dont

SAFT (pour le Lithium-Ion) et Bolloré Technologies (pour le Lithium-poly-mère) sont les principaux fabricants en France. Leur aboutissement envisagé pour 2003 permettra d'accroître l'autonomie des véhicules électriques jusqu'à 250 km. Il s'agit des programmes VEDELIC (PSA) et RVE 2000 (RENAULT).

Il existe aussi, dans une perspective à plus long terme, des recherches sur la pile à combustible menées par le CEA à Grenoble¹. Il s'agit de la première phase du projet VPE/PAC (Véhicule Propre Électrique/Pile À Combustibles), dont la deuxième phase s'attachera à résoudre les problèmes liés à l'embarquement sur véhicule, au stockage de l'hydrogène, et à sa production par reformage à partir de carburant (méthanol, éthanol, essence). La pile à combustibles permet d'accumuler des connaissances sur un tronc commun à toutes ces filières possibles. Récemment, il a été annoncé la constitution de deux partenariats européens. L'un entre Renault, Volvo, l'Air Liquide et les sociétés italiennes Denora et

¹ Grenoble est un pôle pour les technologies avancées plus ou moins cousines des techniques spatiales développées à Sassenage par l'Air Liquide pour Ariane.

Ansaldo pour le développement d'un véhicule utilisant les piles à combustibles avec de l'hydrogène liquide. L'autre entre PSA, Renault, le CEA, l'Air Liquide, la société belge Solvay et Denora pour un véhicule utilisant l'hydrogène comprimé.

Tout récemment, GEC-Alsthom s'est

associé à la société canadienne Ballard pour développer un programme de piles à combustibles destinées non pas à l'automobile mais aux applications statiques, ce qui confirme l'intérêt stratégique de cette filière aux yeux des grands industriels du secteur (Chrysler, Ford, GEC-Alsthom, Mercedes, Toyota...).

II. Aux Etats-Unis

L'effort des Etats-Unis en faveur du véhicule électrique est plus récent. Il a été considérablement accru à partir des années 90 avec, d'une part, la volonté des autorités de certains Etats (Californie), d'obliger les constructeurs automobiles à consacrer un certain pourcentage de leur production aux véhicules propres (Zéro-emissions véhicule, ZEV, et Ultra Low emissions véhicules, ULEV) ; et d'autre part, la mise en place du programme fédéral « **Partnership for a new generation vehicle** », (PNGV) visant à développer un véhicule de nouvelle génération. Suivant une méthode très américaine (très inspirée par le précédent « challenge » du débarquement sur la lune), les américains se sont donnés pour défi de créer un véhicule du futur dont la consommation serait inférieure à 3 litres au 100 km ; objectif très ambitieux pour ce pays où la faiblesse des taxes sur les carburants, parmi les moins élevées des pays industrialisés, n'incite pas le consommateur à rechercher l'économie d'énergie. Ce programme contient d'importants développements en faveur des batteries électriques, des voitures électriques, des véhicules hybrides, et des piles à combustibles. (Voir

l'annexe 2 sur le programme PNGV).

Sous la pression de la réglementation californienne, les constructeurs ont emboité le pas dans la marche vers le véhicule électrique. En 1995, Général Motors a lancé sur le marché un petit véhicule électrique : l'EVI. Il s'agit d'un véhicule "coupé", 2 portes, 2 places, d'allure sportive capable d'une vitesse de pointe de 130 km/h et d'une autonomie de 100 kms environ². Ce véhicule a d'abord été proposé au prix de leasing de 530 \$ par mois, sans grand succès. Mais Général Motors a pris tout récemment la décision de baisser le coût du leasing à 400 \$, sans doute pour prouver ses bonnes intentions vis-à-vis du véhicule électrique où dans un contexte où la pression de l'opinion publique contre la pollution de l'air liée à l'automobile se fait plus forte. Le phénomène est similaire à celui qui se produit dans d'autres secteurs de l'économie tel que pour les fabricants de cigarettes. Il devient vital, particulièrement pour les grandes sociétés, de soigner leur image de marque vis-à-vis de tous risques pesant sur la santé des individus³.

² Moins par grand froid.

³ Voir le numéro 38 de 2001 PLUS consacré aux controverses sur le véhicule électrique en Californie (C. LAMURE).

Le marché du véhicule électrique aux USA

Un article paru dans le Financial Times du 12 juin 1997 fait état des difficultés que rencontrent les constructeurs américains et les autorités de l'Etat de Californie pour convaincre le consommateur américain d'acheter un véhicule électrique. En dépit de son lancement fin 1996, et d'une campagne de publicité dont le montant s'élève à 219.000 \$ par véhicule, l'EVI de Général Motors n'a trouvé que 176 acheteurs. Cet insuccès a conduit Général Motors à abaisser son prix de leasing de 530 à 400 dollars. Il reste que l'EVI est équipé de batteries plomb. J.D. Power, influent spécialiste de marketing, a fait une étude selon laquelle il n'y a qu'un consommateur sur quatre qui serait prêt à envisager l'achat ou le leasing d'une voiture électrique, et encore pourvu que celle-ci réponde à leurs besoins de déplacement. « Le vrai succès de la voiture électrique repose sur sa performance comme moyen de déplacement, pas comme solution aux problèmes environnementaux », indique t'il. Il a interviewé 400 personnes par téléphone et trouvé que les 77 % des personnes qui se déclaraient peu intéressées par le véhicule électrique étaient inquiètes des problèmes de fiabilité, du manque de stations de recharge, et de la possible complexité des opérations de recharge. L'Etat de Californie, qui a maintenu, jusqu'à maintenant, son obligation faite aux constructeurs de fournir 10 % du marché en véhicules propres en 2003, étudie avec attention le comportement du marché pour savoir jusqu'à quel point il est nécessaire d'abaisser le prix pour vaincre la réticence du consommateur.

Signalons également une collaboration du fabricant français de batteries SAFT avec l'USABC (United States Advanced Batteries Consortium) pour la recherche et le développement d'une batterie Nickel-Métal Hydrure (Ni-MH) pour véhicules électriques.

Si les tentatives actuelles des constructeurs américains aux Etats-Unis

n'ont pas été couronnées de succès, il faut, cependant, se garder de croire qu'ils ne seront pas des compétiteurs redoutables pour le marché du véhicule du futur : leurs efforts actuels en faveur des véhicules électriques, ou hybrides, et des piles à combustibles, sont très importants.

III. Au Canada

Au Canada, Hydro-Québec, l'équivalent d'EDF, travaille sur les batteries pour voitures électriques et vient de constituer une "Joint-Venture" avec la compagnie américaine 3M

pour développer la technologie Lithium-Ion, financée en partie par les trois géants de l'industrie automobile américaine.

IV. Au Japon

Le Japon mène des travaux de recherche importants sur les piles du futur : principalement le Lithium-Ion et les piles à combustibles. Sony a annoncé la prochaine sortie d'une pile Lithium-Ion conçue pour le véhi-

cule électrique. Le Japon travaille également sur les hybrides. Toyota a annoncé récemment la sortie fin 97 d'un véhicule hybride, PRIUS, combinant moteur à essence et moteur électrique (Voir l'encadré).

Le véhicule hybride PRIUS

L'événement du dernier salon des véhicules électriques à Orlando (USA) en décembre 1997 est bien la nouvelle TOYOTA «Prius», véhicule hybride dont le concept très intéressant consiste à exploiter le moteur thermique en régime de base (sauf à l'arrêt ou il est coupé), et le moteur électrique alimenté par la batterie pour assurer la demande d'énergie de pointe. La batterie fait office de tampon et est d'ailleurs maintenue en permanence près de sa capacité maximale. Autrement dit, chaque source d'énergie (batterie pour le moteur électrique et moteur thermique pour la traction mécanique de base) est utilisée dans les zones où son rendement est le plus efficient : le moteur thermique en régime variant lentement, et la batterie en régime transitoire mais près de sa pleine capacité (là où les pertes de rendement énergie entrante par rapport à énergie sortante sont faibles).

Cette voiture ne consomme que 4 litres d'essence aux 100 km, ce qui représente seulement la moitié du véhicule conventionnel correspondant. C'est l'ordinateur de bord qui se charge de la gestion entre les 2 énergies, électriques et thermiques, pour optimiser les consommations et les niveaux de pollution. Il est lancé à un prix de 120.000 F pour se situer au prix d'une berline classique, donc certainement bien au-dessous du prix de revient réel, pour le constructeur nippon, il s'agit d'un investissement sur le futur, pour créer le marché.

Ce véhicule n'est donc pas un véhicule zéro émission (concept dont l'avantage est collectif et dont le client ne se sent pas prêt à payer le surcoût, surtout s'il est important), mais bien d'un véhicule peu coûteux en consommation d'essence (et cela l'utilisateur est prêt à le payer). S'il est par ailleurs très peu polluant, ce qui est le cas, l'avantage est plus collectif qu'individuel.

Le résultat ne s'est pas fait attendre : Toyota a vendu 2000 par mois depuis que le modèle est sorti, et compte en produire 1000 par mois en moyenne en 1998. Expérience à suivre attentivement.

Toyota travaille également sur un projet de véhicule avec une pile à combustible, le RAV4 FCEV, qui est en fait un hybride dans lequel la pile à combustible est dimensionnée sur la puissance moyenne de 25kW et le moteur électrique sur la puissance de pointe de 50kW, [la puissance tampon étant assurée par la batterie]. Compte tenu à la fois de

sa puissance économique et industrielle, de son haut niveau de vie, de l'effort de recherche et développement très intense dans le secteur automobile, et de la densité de ses villes, le Japon est certainement l'un des pays où le véhicule électrique a le plus de chances de déboucher dans un délai rapproché.

V. En Allemagne

En Allemagne, Volkswagen a annoncé la sortie d'une nouvelle version électrique de l'Escort : la CityStromer. Ce véhicule a une autonomie de 120 km et une vitesse maxi de 105 km/h. Le ministère de

la Recherche et de la technologie a réalisé une expérience pilote sur l'île de Rügen en mer Baltique, avec 60 berlines, bus et camionnettes équipées de piles sodium-sulfure (qui semblent souffrir d'un manque

de fiabilité) ou de piles plomb (donc pas très performantes). L'Allemagne se déclare, contre, la pile Cadmium - Nickel pour des raisons sans doute non dénuées d'arrière pensées (leurs industriels ne semblent pas encore prêts à fournir des véhicules électriques). Mercedes-Benz travaille également sur un véhicule équipé de piles à combustible, NECAR 1, NECAR 2, et NECAR 3, dont les évolutions correspondent à des degrés croissants de compacité et de présentabilité au marché. NECAR 3 reprends la structure de la Classe A, et utilise comme carburant le méthanol, comme meilleur compromis pour Mercedes entre l'efficacité énergétique du convertisseur en hydrogène (80 %) et les problèmes de logistique. Cela permet à Mercedes de revendiquer une efficacité énergétique opératoire (au niveau du seul véhicule) de 31 % aujourd'hui à 40 % dans le futur contre 21 à 24 % pour les meilleurs véhicules diesel.

Dans la majorité des cas, il faut remarquer qu'il s'agit plutôt d'expérimentations que d'un véritable début de commercialisation. Dans le domaine de la voiture électrique, la France dispose d'une antériorité certaine en matière de recherche,

de développement, et d'industrialisation des véhicules électriques. Elle est le seul pays à avoir développé des batteries performantes Cadmium-Nickel disponibles au stade industriel (SAFT est le premier producteur de batteries au monde à avoir investi dans une ligne de production d'une capacité de 5000 unités par an). L'industrie française travaille aussi activement sur les piles du futur Lithium-Ion. Elle a donc privilégié la filière du véhicule électrique pur qui correspond à un usage spécifiquement urbain ou périurbain, mais exclusif de l'interurbain. En raison de cet usage limité, il s'agit essentiellement du marchés des flottes (entreprises ou collectivités locales, ou usages professionnels). Il serait cependant regrettable qu'elle se laisse déborder par l'outsider du véhicule hybride, avec ses deux variantes : moteur thermique ou piles à combustibles, dont l'autonomie comparable à celle d'un véhicule classique autorise un usage plus polyvalent, et correspond mieux au marché du véhicule pour particulier. Il s'agit certes de marchés distincts, mais aucun de ces marchés ne doit-être oublié ou négligé dans le contexte de la mondialisation.

PERSPECTIVES POUR L'AVENIR

Comme cela a déjà été dit, le véhicule électrique, est encore trop cher du point de vue du consommateur

pour ne pas rendre nécessaire toute une politique d'accompagnement et d'incitation par les Pouvoirs Publics.

I. Les raisons d'un choix

Cette politique peut légitimement se justifier pour plusieurs raisons :

- les problèmes d'environnement planétaire (effet de serre) doivent être sérieusement pris en compte dès aujourd'hui pour permettre un développement durable sur le long terme. Le véhicule électrique peut s'avérer être une solution très efficace à condition que l'électricité utilisée ne soit pas elle même génératrice de pollution. Or, grâce aux efforts accomplis durant la période qui a suivi la crise énergétique de 1973, la France est devenue l'un des pays les moins polluants du point de vue de l'émission de gaz à effet de serre par unité produite. Pour l'avenir, ces préoccupations d'effet de serre risquent de s'amplifier et de se transformer en un enjeu majeur mettant en cause la **survie des générations futures**. Il est donc essentiel pour nous, sinon d'améliorer, du moins de consolider notre position de pays peu polluant par ses émissions de gaz à effet de serre.
- Les problèmes de santé publique liés à la **qualité de l'air** dans les villes seront une demande sociale

de plus en plus grande au fur et à mesure que le niveau de vie de nos pays s'accroîtra. Il est intéressant de remarquer que, malgré le fait que la qualité de l'air dans nos villes se soit, pour de nombreux critères, objectivement améliorée au cours des dernières décennies, les récriminations contre la pollution de l'air n'ont jamais été aussi fortes. Il s'agit d'un enjeu crucial pour notre avenir et nous devons le prendre en compte. Notre problème est de trouver les voies qui minimisent les coûts économiques de cette prévention.

- Il faut aussi prendre en compte une **tendance à long terme au renchérissement du pétrole** et donc des carburants. Même s'il y a des variations dans un sens ou dans un autre des prix du pétrole en fonction des aléas climatiques et politique, du taux de change du dollar, et des événements au Moyen Orient, il est indiscutable que nous allons vers un renchérissement progressif à long terme parallèle à l'épuisement des ressources. L'Agence Internationale de l'énergie a publié des perspectives mondiales qui prévoient une

augmentation de la demande énergétique mondiale de 35 % entre 1993 et 2010, satisfaite pour l'essentiel par des combustibles fossiles. Les émissions de gaz à effet de serre augmenteront dans la même proportion. Et la dépendance des pays de l'OCDE à l'égard des importations de pétrole pourrait atteindre 60 % en 2010 contre 50 % actuellement. Il faut, cependant, se rappeler qu'il ne devrait pas y avoir de pénurie globale avant le milieu du prochain siècle, en raison de l'amélioration des techniques d'exploration et d'exploitation des gisements pétroliers, et de l'accroissement des gisements potentiellement exploitables.

- Les freins principaux actuels à l'utilisation par le grand public du véhicule électrique (électrique pur ou hybride) sont comme on l'a vu le prix d'achat et aussi une certaine spécialisation ou limitation dans le type d'usage qu'il autorise. Or, avec l'élévation continue du niveau de vie, et la multimotorisation qui en est la conséquence, ces freins vont disparaître. Le véhicule électrique ne peut certainement pas être la pre-

mière voiture d'un foyer, car il faut alors une autonomie traditionnelle de l'ordre de 500 kms. Mais pourquoi pas le véhicule « convivial » spécialisé dans les petits déplacements urbains que l'on aurait en 2^e voiture ou même en 3^e voiture. Ce n'est pas un hasard si l'un des pays où le véhicule électrique commence à percer est la Suisse, le pays occidental le plus riche [5]. On peut avancer le même argument pour la Californie, état riche parmi les Etats-Unis déjà riches.

Selon une étude réalisée aux USA [10], concernant le marché des véhicules pour les particuliers possesseurs de plusieurs voitures, il y a ainsi 38 % des ménages pour lesquels le choix d'un véhicule électrique – en dépit de la contrainte de la faible autonomie – serait tout à fait possible dès lors que ces ménages disposeraient d'un parc "hybride" (c'est-à-dire un véhicule électrique + un véhicule traditionnel). Cet exemple illustre, d'ailleurs, les perspectives très différentes que l'on peut avoir selon la notion même d'hybridation (tableau n° 15).

Tableau n° 15

Les trois niveaux auxquels on peut concevoir le caractère hybride	
Ménage	Avoir un véhicule thermique, à forte autonomie, et un véhicule électrique pour les petits déplacements urbains.
Moteur de traction	Présence sur le même véhicule de deux chaînes de traction, l'un utilisant le moteur électrique, et l'autre, utilisant le moteur thermique.
Carburants	Présence sur le même véhicule de deux sources d'énergies alternatives pour alimenter le même moteur de traction (exemple : G.P.L. et essence en amont d'un moteur thermique, ou électricité du réseau et moteur thermique ou piles à combustibles en amont d'une traction électrique).

- Nous sommes maintenant dans des économies à faible inflation où les taux d'intérêt ont récemment fortement décliné. Le consommateur a un comportement beaucoup plus attentif au coût d'usage, et est probablement mieux disposé à « in-

vestir » : il est prêt à payer un peu plus cher un véhicule électrique ou hybride s'il lui apporte un moindre prix de revient kilométrique.

- Il y a un intérêt industriel évident à nous placer sur un marché émer-

gent pour le futur, comme celui de la voiture électrique au sens large (incluant les véhicules hybrides et les piles à combustibles). Si nous prenons pied sur ce marché au bon moment, c'est-à-dire au début de son « éclosion », nous nous impo-

serons comme pays fournisseur de cette technologie vis-à-vis des autres nations. C'est ce qu'a su faire la France dans le domaine du véhicule diesel, jugé trop cher il y a 20 ans par le consommateur, ou dans celui du train à grande vitesse.

II. Face à ce défi, quelles doivent être les actions des Pouvoirs Publics ?

Il faut mettre en oeuvre non pas un type d'action, mais toute une stratégie diversifiée d'accompagnement des efforts des industriels pour promouvoir la voiture électrique.

1. **La recherche** : L'action la plus importante qu'ont déjà entreprise les Pouvoirs Publics, et qu'il faut continuer, est de soutenir les pro-

grammes de recherche. Le véhicule électrique a fait l'objet de très grands efforts de la part du budget public et des constructeurs automobiles au cours de ces dernières années. Ces efforts doivent être poursuivis pour ne pas en perdre le bénéfice. (Voir le tableau n° 16).

Tableau n° 16

Les aides publiques de promotion de la recherche pour le véhicule électrique <i>source : ministère de l'Industrie</i>	
Année	Montant de l'aide publique (en million de F)
1992	74.9
1993/94	51.0
1995	69.8
1996	63.5
Total	259.22

- Depuis le début des années 90 les aides publiques à la recherche sont, chaque année de l'ordre de 70 millions de francs.

Notons qu'il s'agit là de la part payée par l'Etat, à laquelle vient s'ajouter la part payée par les industriels. En 1996, par exemple, l'Etat a apporté un soutien de 64 millions de Francs sur un pro-

gramme total de recherches mené par les industriels de 265 millions de francs. On voit donc l'effet de levier considérable puisqu'il s'agit de sommes dont l'ordre de grandeur atteint le milliard de francs sur l'ensemble des cinq années.

Il faut se placer dans une logique de filière et élargir l'effort sur les millions qui manquent aujourd'hui.

d'hui pour que le véhicule électrique soit acceptable par le consommateur. Mais cela suppose d'aller au delà des axes traditionnels développés au cours des années passées et qui ont déjà été bien explorés (par exemple, les différents types de couples électrochimiques), pour aborder des sujets « périphériques », autour de l'utilisation des batteries actuelles. Citons, par exemple, les problèmes liés à la maintenance et au recyclage des batteries NiCd, ou encore les moyens, de mesurer, de manière fiable, l'état de charge de ces batteries (on peut en être surpris, mais ce problème n'est pas encore bien résolu). Il faut aussi travailler sur la réduction de la consommation d'énergie par les équipements divers (chauffage, climatisation, lampes, chauffe-vitre) car l'énergie est rare (et chère en perte d'autonomie) dans le véhicule électrique. Enfin, dans le cas du véhicule hybride seulement, il faut travailler sur l'optimisation de la gestion des appels d'énergie (répartition des puissances thermiques et électriques, répartition des dimensionnements puissance et énergie, logiciels de simulation, veille du moteur thermique, supercondensateurs, logiciels de gestion, etc.).

D'une manière plus générale, **nous devons favoriser les thèmes de recherche ou, il y a synergie entre les besoins du véhicule électrique et les besoins des véhicules thermiques** : Cette synergie peut jouer dans les deux sens : d'abord, faire bénéficier les véhicules électrique des faibles prix des pièces produites en grande série pour le véhicule thermique ; et ensuite réutiliser, à l'avantage du véhicule thermique, les progrès rendus nécessaires pour l'aboutissement du véhicule électrique (isolation au vent extérieur, et isolation thermique du véhicule), équipement à faible consommation de courant, extension vers le bas de la gamme des moteurs thermiques, régimes d'économie d'énergie à l'arrêt du véhicule...

2. **Compenser le surcoût du véhicule électrique** : Il faut sans doute compléter l'aide à la recherche, par une aide à l'achat, soit sous forme fiscale (vignette, notamment dans les départements fortement pollués), soit sous forme d'une forte « prime à l'achat » qui compenserait, à 50 %, le surcoût de la batterie. L'objectif serait moins un soutien global au marché automobile dans son ensemble, qu'une incitation ciblée permettant de faire, enfin, démarrer le petit marché spécifique du véhicule électrique (**où l'offre en série du véhicule est française**). Il y a une réelle avance technique française, qu'il faut exploiter rapidement sur le plan commercial, faute d'être dépassé par les efforts engagés plus récemment par des pays étrangers concurrents (USA, Japon, Allemagne). Le GIVE (Groupe Interministériel Véhicules Electriques) a été constitué pour coordonner et promouvoir les actions qui peuvent être prises par les pouvoirs public.
3. **Une politique de priorité aux véhicules propres** : on assiste incontestablement à une évolution des politiques des grandes villes concernées par les problèmes de pollution (Paris, Lyon, Grenoble, Strasbourg, pour n'en citer que quelques exemples). Celles-ci donnent désormais la priorité aux véhicules non polluants, dans les zones denses, de façon à lutter contre la pollution automobile. Le véhicule électrique a sa place dans ces politiques. Même à l'arrêt dans un encombrement de circulation, le véhicule électrique ne pollue absolument pas, ce qui n'est pas le cas des véhicules thermiques. Les modalités de ces actions en faveur du véhicule électrique peuvent prendre des formes très diverses. Ainsi, à Paris, le stationnement dans les parkings extérieurs (en surface) est gratuit pour le véhicule électrique. Il s'agit là d'un avantage non négligeable qui mériterait d'être connu, car le public dans sa grande majorité l'ignore.

4. **Diversifier l'offre du véhicule électrique** : il s'agit ici d'apporter une réponse à la demande de l'utilisateur, qui n'est pas la voiture pour elle-même, mais un besoin de déplacement auquel il peut espérer trouver une réponse dans toute une panoplie de moyens : vélos, scooters, métro, autobus, minibus, taxis, voiture à usage partagé,...

Nous avons l'exemple du Japon où la **bicyclette électrique** rencontre un grand succès, surtout pour les personnes âgées dont elle constitue le moyen de locomotion idéal en combiné avec les transports en commun. La bicyclette électrique est par nature un engin hybride utilisant la force électrique comme la force musculaire, ce qui présente le double avantage d'augmenter l'autonomie et de rendre l'effort physique moins pénible : le pédalage sert de commande à l'assistance motorisée. Dans la même perspective, la sortie depuis octobre 1996 sur le marché français par les cycles Peugeot d'un petit **scooter électrique**, utilisable dès 14 ans et sans permis, facile à recharger chez soi, équipé d'une batterie NiCd (doté d'une autonomie de 40 km et dont la vitesse peut atteindre 45 km/h), est une initiative à suivre.

Les **bus électriques** sont aussi et déjà une expérience réussie en France avec l'exemple du bus de Montmartre, mais on peut aussi les concevoir hybrides, comme les bennes à ordures. Ces exemples méritent d'être repris et étendus à d'autres sites en choisissant ceux qui présentent les profils de mission les plus favorables à l'usage du véhicule électrique. On peut aussi envisager des tramways dont une partie du trajet pourrait être effectuée

sans caténaire*, grâce à des batteries. Comme on le voit, la traction électrique se décline dans beaucoup de variantes.

Il est en général admis que si le véhicule électrique n'a pas percé à ce jour, c'est plus pour des raisons qui tiennent à la nécessité de repenser totalement l'organisation urbaine - fortement marquée par la voiture traditionnelle, qu'en raison du manque d'intérêt potentiel du véhicule électrique. Il faut essayer de transformer cet handicap en avantages en exploitant toutes les synergies possibles entre la voiture traditionnelle et électrique. Le problème environnemental est déjà partiellement pris en compte par les nouvelles normes européennes sur les véhicules neufs et le renouvellement du parc. Mais il n'est que partiellement résolu. Il y a aussi et surtout, la congestion urbaine qui oblige à des temps de déplacement domicile-travail de plus en plus longs et qui est le réel problème de nos grandes villes du futur. Il faut trouver des solutions face à la distance grandissante entre le logement, situé de plus en plus en banlieue, et le bureau situé de plus en plus en quartier d'affaires hyperdense. Le véhicule électrique utilisé en combinaison avec les transports en commun représente une réponse très pertinente à la fois sur le plan environnemental, et sur celui de la qualité de vie (réduction de la congestion urbaine, réduction du temps domicile-travail). Les contraintes à surmonter sont multiples et exigent une coordination à tous les niveaux des acteurs de la vie publique, cet effort est très largement justifié par l'enjeu que constitue le fait de préserver le caractère vivable de nos villes dans le futur.

* Les caténaires sont parfois jugés peu esthétiques.

ANNEXES

La recherche gouvernementale américaine sur les carburants et les véhicules de transport alternatifs

Federal Research on Alternative Transportation Fuels and Vehicles

Federal funding for transportation vehicles and fuels is dominated by the aeronautical research of the National Aeronautics and Space Administration (NASA) and the Department of Defense (ICC 1994). Although some of the research conducted by these two agencies is important to surface transportation and is discussed briefly, the main focus of this appendix is on the civilian sectors, encompassing research in the Department of Energy (DOE), Department of Transportation (DOT), and several other federal agencies.

Department of Energy

Most federally supported R & D for surface transportation vehicles and fuels in the civilian sector is funded through DOE. Overall funding for transportation fuel and vehicle R & D for 1996 was about \$207 million. This funding was down about 9 percent from 1995 as DOE's energy efficiency and renewable energy programs were reduced significantly. Historically, DOE's budget has been subject to swings as a result of changes in the priorities of presidential administrations and Congress. For example, the Department's electric and hybrid vehicle program was pared back from about \$38 million in 1979 to about \$8 million by 1985 ; by 1994 it had risen to about \$72 million (OTA 1995). Such fluctuations may continue as efforts are made to reduce the federal deficit.

* Source : U.S. Department of Energy.

**DOE FY 1996 R & D funding in transportation
fuels and vehicles is allocated as follows :**

Program	Millions of Dollars
Alternative fuel vehicle (mainly natural gas) R & D	18.0
Alternative fuel vehicle deployment	11.0
Biofuels	30.2
Electric (battery) vehicles	18.5
Hybrid vehicles	53.3
Fuel cells	21.5
Propulsion system materials	20.1
Lightweight vehicle materials	13.3
Light-duty engine technology	15.5
Heavy-duty vehicle R & D	15.4
Management/other	19.4

Much of DOE support for alternative fuel vehicles is directed to advances in natural gas vehicles. Cleaner burning natural gas emits fewer air pollutants and generates less carbon dioxide than gasoline. Prototype vehicles powered by natural gas have exhibited increased range but these vehicles remain uncompetitive in cost and performance compared with gasoline- and diesel-fueled vehicles. FY 1996 funding for alternative-fuel vehicle R & D (mostly natural gas) was \$18 million. Another \$11 million was spent in grants to support development of refueling stations and to subsidize use of natural gas vehicles in private and government (transit, school bus, heavy-duty municipal vehicle) fleets.

DOE also has a substantial biofuels program (about \$80 million in FY 1996), of which the transportation component is about \$30 million. The program funds research on biomass feedstocks, development of alcohol fuels from unconventional sources such as cellulosic biomass, and development of biodiesel (biomass additives to diesel), among other activities. From the standpoint of the full production cycle, some biomass-derived alcohol fuels (such as those derived from certain grasses, woody plants, and other cellulosic sources) have the potential to reduce the carbon content of transportation fuels. An R & D goal of DOE is to make the most promising alcohol fuels (in terms of carbon emissions) more price-competitive with gasoline and diesel fuel.

DOE's longer-range research efforts are in alternative propulsion systems, such as pure electric-drive vehicles and "hybrid" vehicles powered by electricity and an internal combustion engine. The electric vehicle R & D program focuses on advances in batteries. Much of the program is conducted under a cooperative agreement between DOE and the Advanced Battery Consortium (ABC), formed in 1991 by Chrysler Corporation, Ford Motor Company, and General Motors. Because electric vehicles could help reduce mobile source air pollution while allowing electric utilities to utilize excess capacity during off-peak hours, the electric power industry has joined in this effort. DOE joined the consortium in 1991 following a legislative mandate to pursue the benefits of electric vehicles, and the Department now has an active role in managing the collaborative research program. The long-term goal of ABC is to develop a battery that will enable electric vehicles to compete with petroleum-powered vehicles in terms of performance and cost. Efforts so far have been focused on the development of a battery that would allow a vehicle to travel at least 100 miles under routine driving conditions.

Another long-range research area is the development of hydrogen as a fuel for use in internal combustion engines and fuel cells. DOE's hydrogen research budget was about \$14 million in 1996. Through this research program, the Department works with industry and a scientific advisory panel to develop safe, practical, and competitive hydrogen technologies to meet energy needs. Research issues include how to safely transmit and store hydrogen for energy applications in transportation and other sectors. Through other budget categories DOE is also investigating fuel sources other than hydrogen for fuel cells, such as methanol.

Partnership for a New Generation of Vehicles

The Partnership for a New Generation of Vehicles (PNGV) research program, initiated in late 1993, is a cooperative research program between the U.S. Council for Automotive Research, a research consortium formed by Chrysler, Ford, and General Motors. One of the goals of PNGV is to develop a vehicle that will achieve up to three times the fuel economy of today's family-oriented vehicles while maintaining or improving current levels of performance, size, utility, and total cost of ownership and meeting or exceeding federal safety and emissions requirements. Advanced R & D on such technologies as compression ignition direct injection engines, gas turbines, fuel cells, batteries, flywheels, ultracapacitors, composite materials, and manufacturing is being conducted and coordinated under the program in an effort to meet these goals (National Research Council 1996).

Federal government expenditures on the PNGV research program are not organized as a line item in the federal budget ; rather, they come from a variety of programs across agencies. For example, a substantial part of DOE's advanced automotive technology program, which funds research on advanced engines, materials, and storage devices, is counted as PNGV research expenditure. Total federal expenditures on PNGV research for FY 1995 and FY 1996 are estimated at about \$270 and \$293 million, respectively (see Table B-1) (OTA 1995 ; R. Chapman, Program Manager, PNGV, Testimony before House Subcommittee on Energy and Environment, July 30, 1996). Among the federal agencies contributing to PNGV are the U.S. Department of Commerce (which manages the federal role), DOE, DoD, Department of the Interior (DOI), Environmental Protection Agency (EPA), NASA, and National Science Foundation (NSF).

Table B-1 PNGV-Related FY 1995 Appropriations by Technical Area and Agency (OTA 1995)

Allocation by Agency (\$ millions)									
Technical	DOC ^a	DOD ^b	DOE	DOI	DOT	EPA ^c	NASA	NSF	Total
Lightweight materials	6.83	7.03	47.42	0.50				19.24	81.02
Energy conversion			70.47			2.75		0.84	74.06
Energy storage	0.04		0.47			2.00		2.69	5.20
Efficient electrical systems		1.20					1.00	15.41	17.61
Exhaust energy recovery			1.04				0.20		1.24
Analysis and design methods	1.50	1.98	3.71				2.20	1.85	11.24
Reduction of mechanical losses	0.25							1.25	1.50
Aerodynamic and rolling improvements			0.78						0.78
Advanced manufacturing	10.46	2.75	23.64					4.61	41.46
Improved internal combustion	0.58	11.02	7.04			2.90	0.25	3.02	24.81
Emissions control			3.78				1.35	2.07	7.20
Fuel preparation, delivery, storage								0.15	0.15
Efficient heating, cooling, etc.			0.50					2.81	3.31
Crashworthiness								0.14	0.14
Total	19.66	23.98	158.85	0.50	0.00	7.65	5.00	54.08	269.72

NOTE : Allocations are specific to PNGV and identified as such. In FY96, \$1 million of the \$20 million will be targeted specifically for PNGV. DOC = Department of Commerce ; DOD = Department of Defense ; DOE = DOE Department of Energy ; DOI = Department of the Interior ; DOT = Department of Transportation ; EPA = Environmental Protection Agency ; NASA = National Aeronautics and Space Administration ; NSF = National Science Foundation ; PNGV = Partnership for a New Generation of Vehicles ; R&D = research and development.

^a In addition to the base of \$19.7 million, DOC through the National Institute of Standards and Technology's Advanced Technology Program has selected relevant projects with requested funding of \$30.1 million.

^b DOD allocations are based on information from program personnel and were tentative at the time this table was prepared.

^c EPA allocations were still in discussion at the time this table was prepared.

Source : PNGV Secretariat.

Related and complementary research is being conducted in industry, with its share of PNGV research being contributed in kind at a level equivalent to what is being spent by government. Of course, automotive manufacturers, parts suppliers, and energy companies conduct proprietary research on alternative vehicles and fuels that is difficult to quantify.

Department of Transportation

DOT vehicle and fuel R & D is more modest and limited in scope compared with the DOE programs. A new effort is under way in the Federal Railroad Administration (FRA) on high-speed rail and a small program is ongoing in the Federal Transit Administration (FTA).

Roughly \$25 million was authorized in 1996 for FRA's R & D program on high-speed rail. This program is focused on incremental changes in speed (up to 125 mph). Expenditures are focused on safety issues (train signalling and control technologies to allow mixing of freight and passenger trains and to address grade-crossing hazards). A small share of funds (less than \$5 million annually) is being spent on upgraded diesel propulsion systems and experimental flywheels to improve acceleration. Funding for magnetically levitated (mag lev) trains has largely been eliminated because of technical, cost, and market challenges.

FTA has managed and funded the development of buses powered by fuel cells. Expenditures in 1996 are roughly \$10 million transferred from DOE). Prototype vehicles have been produced, which are now in a pilot testing and demonstration phase. The agency is also participating in a smaller-scale R & D effort on advanced lead-acid batteries for transit vehicle applications. FTA also provides funds to assist local transit agencies in purchasing compressed natural gas buses.

Department of Defense

Though focused on military applications, DoD R & D programs have traditionally had broader influence. Perhaps the most closely tied to the commercial transportation sector is the research

conducted by the Defense Advanced Research Programs Agency (DARPA), which had a \$14.7 million program in electric vehicles in FY 1996. Through this program, the Department funds seven national consortia that are integrating and promoting hybrid electric vehicles for military and commercial applications. The consortia include other public and private funds not included in the figure above. Though many DARPA initiatives are specifically designed for military application, such as developing prototype hybrid electric drive "Humvee" vehicles, the technology may generate commercial interest. DARPA initiatives that are more closely related to commercial applications : small electric (commuter-style) passenger vehicles, hybrid electric buses, electric pickup trucks, and neighborhood electric vehicles are being pursued. Some component technologies being investigated would clearly have dual applications (recharging stations, improved drive trains and electric motor designs, and advanced battery technologies). DoD R & D that is related to the PNGV program is estimated by PNGV program staff as approximately \$25 million in FY 1996.

Other

EPA funds a substantial laboratory to test new vehicle and fuel concepts and technologies, funding for which totaled \$68 million in 1996. This work is mostly related to Clean Air Act mandates, including analysis of catalysts for reducing emissions that cause air pollution and to prompt industry to develop new technologies to achieve mission reductions. Undoubtedly most of the vehicle R & D to meet Clean Air Act mandates occurs in industry and far exceeds the scale of federal funding. NSF estimates that approximately \$54 million of NSF support in FY 1995 was for projects with the potential to improve the design, production, use, disposal, and recycling of automobiles and their accessories or components (J. Bordogna, Assistant Director for Engineering, NSF, Statement before House Subcommittee on Energy and Environment, July 30, 1996). Most of these projects are integrated research and education awards involving individual university researchers or small groups of faculty with graduate and undergraduate students. NSF funds are also counted as part of the PNGV effort.

Références

ABBREVIATIONS

ICC Interagency Coordinating Committee on Transportation Research and Development

NSF National Science Foundation

OTA Office of Technology Assessment

ICC. 1994. *Strategic Budget Guidance-Full Report of the Interagency Coordinating Committee on Transportation Research and Development*. National Science and Technology Council. Unpublished manuscript, 24 pp.

National Research Council. 1996. *Review of the Research Program for the Partnership for a New Generation of Vehicles*. Commission on Engineering and Technical Systems. National Academy Press, Washington, D.C.

OTA. 1995. *Advanced Automotive Technology : Visions of a Super-Efficient Family Car*. U.S. Congress, Washington, D.C.

DOE. Department of Energy.

ANNEXE II

Le programme américain de recherche pour les nouveaux véhicules (PNGV)

Le PNGV (**Partnership for a New Generation of Vehicles**) est un bel exemple de partenariat entre la recherche publique et l'industrie privée pour orienter la recherche conformément à la fois à l'intérêt général (adaptation aux besoins d'efficacité énergétique sur le long terme) et aux besoins du marché (industrie privée). Ce programme s'inscrit aussi dans un remarquable rétablissement de l'industrie automobile américaine. [On peut se reporter à ce sujet à une autre note de synthèse du Centre de Prospective sur les enjeux de l'industrie automobile américaine] (*).

Le PNGV est un programme coopératif entre le gouvernement américain, et l'USCAR (US Council for Automotive Research, qui rassemble les trois constructeurs automobiles US : Chrysler, Ford, et Général Motors). Il poursuit trois objectifs :

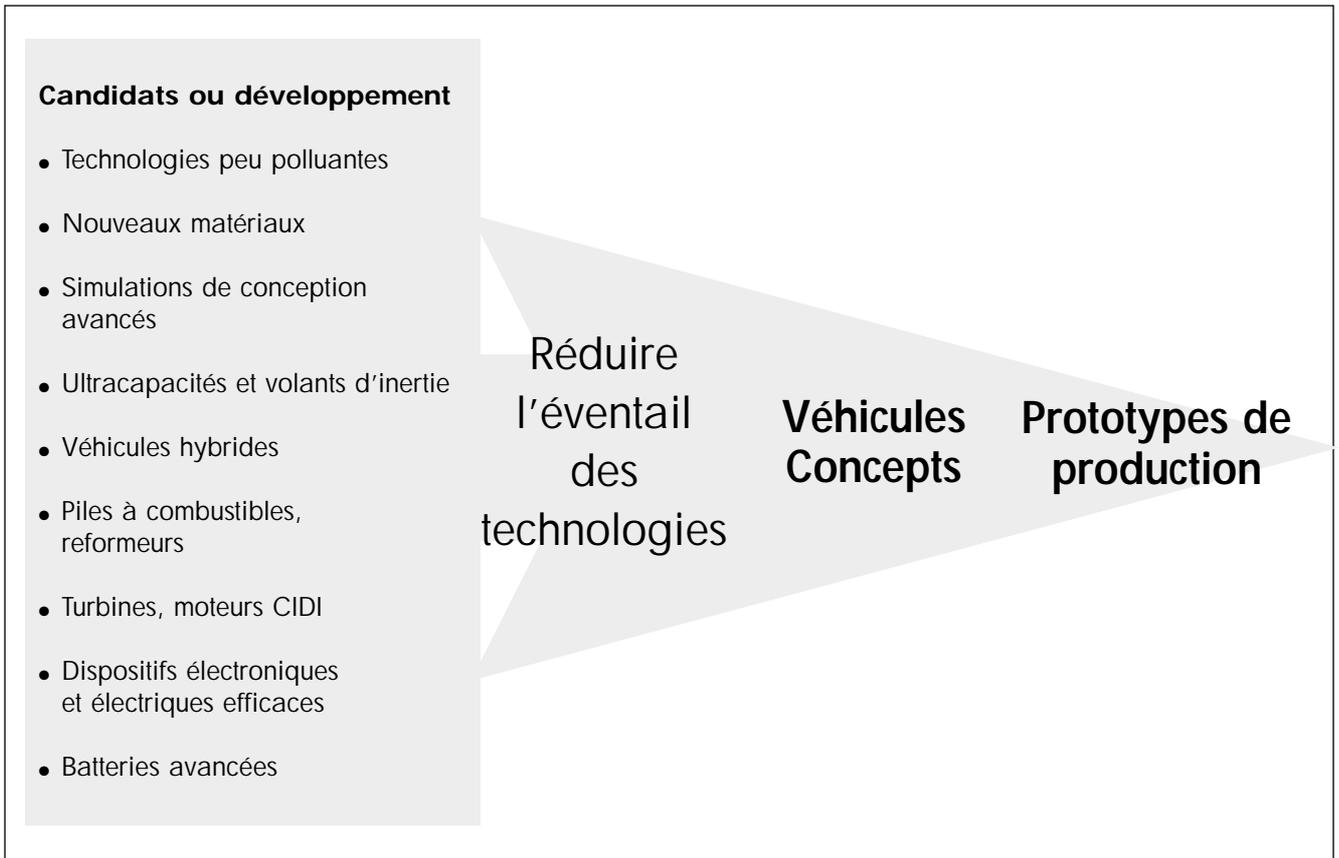
1. Améliorer significativement la compétitivité nationale dans la production automobile.
2. Innover de manière viable sur un plan commercial tout en se démarquant par rapport à la recherche traditionnelle sur les véhicules conventionnels.
3. Développer un véhicule qui consomme trois fois moins de carburant qu'aujourd'hui.

CALENDRIER

Pour atteindre ces objectifs, le PNGV s'est fixé un calendrier volontariste qui peut être résumé dans le tableau suivant.

* Source : Yves Tugayé - Note interne 1997.

Calendrier du PNGV



A la fin de l'année 1997, les efforts se concentreront sur les seules technologies candidates qui auront prouvé leurs capacités à répondre aux objectifs visés à l'intérieur du calendrier ; Les partenaires du programme en profiteront pour développer, d'abord des véhicules de concept (démonstrateurs) qui seront disponibles en l'an 2000, puis des véhicules prototypes en vue de la production, donc commercialisables, en l'an 2004.

TECHNOLOGIES

Beaucoup d'innovations ou d'améliorations de technologies sont nécessaires pour parvenir aux objectifs. A l'intérieur de chaque domaine des technologies candidates sont identifiées. (Voir le tableau ci-après) .

Domaines techniques	Technologies candidates
Allègement des structures et des matériaux	<ul style="list-style-type: none"> ● Optimisation du dessin ● Acier haute résistance ● Composites à matrices polymères ● Céramiques ● Plastiques spéciaux ● Aluminium, titane, magnésium ● Technologies d'assemblage et de collage ● Recyclage ● Réduction des cycles de process et des délais
Production avancée	<ul style="list-style-type: none"> ● Production flexible
Efficacité énergétique	<ul style="list-style-type: none"> ● Moteur 4 temps, injection directe ● Turbines ● Piles à combustibles
Stockage de l'énergie	<ul style="list-style-type: none"> ● Batteries de haute puissance
Systèmes économes en électricité	<ul style="list-style-type: none"> ● Moteurs électriques avancés ● Électroniques de puissance ● Contrôleurs électriques efficaces
Récupération de la chaleur perdue	<ul style="list-style-type: none"> ● Systèmes thermoélectriques
Conception avancée et méthode de dessin	<ul style="list-style-type: none"> ● Simulations ● Dynamique des fluides ● Mécanique des structures ● Prototypage rapide ● études d'adaptation pour les marchés extérieurs
Réduction des pertes mécaniques	<ul style="list-style-type: none"> ● Lubrifiants avancés ● Matériaux à faible friction
Aérodynamiques, diminution des résistances au roulement	<ul style="list-style-type: none"> ● Outils de simulation ● Nouveaux matériaux
Rendement des moteurs thermiques	<ul style="list-style-type: none"> ● Injection stratifiée/mélanges pauvres injection directe ● Contrôle de l'injection du carburant en transitoire
Contrôle des émissions de polluants	<ul style="list-style-type: none"> ● Catalyseurs avancés anti NOx ● Diagnostic embarqués ● Pièces à particules
Formulation, logistique et Stockage des carburants	<ul style="list-style-type: none"> ● Réservoirs hautes pressions ● alternatives de stockages de l'hydrogène ● Reformeurs/processeurs carburants
Gestion de la climatisation	<ul style="list-style-type: none"> ● Fenêtre à faible déperdition ● Chauffage efficace, ventilation et climatisation efficace.

BIBLIOGRAPHIE

1. Jean ORSELLI, Energies nouvelles pour l'automobile, Ed. Paradigme.
2. Claude LAMURE, Quelle automobile dans la ville ? Presse ENPC, 1995.
3. A. NICOLON, Le véhicule électrique. Mythe ou réalité ? Ed. de la maison des sciences de l'homme., 1984, étude pour le Centre de Prospective et de Veille Scientifique.
4. Claude LAMURE, Le véhicule électrique à l'horizon 2004 : controverse en Californie, prémices d'une bataille mondiale, Revue 2001 Plus n° 38, 1997, Centre de Prospective et de Veille Scientifique.
5. Poste d'expansion économique OURVOUAI, Berne. Suisse, Le marché des voitures électriques. Direction des Industries et Services.
6. EDF, Analyse du marché de la propulsion électrique des véhicules utilitaires, 1991.
7. EDF, Le marché du véhicule électrique utilitaire dans les collectivités locales, 1997.
8. Rapport parlementaire de M. LAFFITE, sur l'intérêt du véhicule électrique au regard de la protection de l'environnement, 2 novembre 1993.
9. Patricia DELHOMME, conduite en ville d'un très petit véhicule électrique ou diesel : attitudes et comportements. INRETS, juin 1994.
10. Kenneth S. KURANI, Thomas TURRENTINE, Daniel SPERLING, Testing of electric vehicle demand in hybrid households using a reflexive survey. Institute of Transportation Studies, University of California, Davis. 1996.
11. James J. MACKENZIE, Electric and hydrogen vehicles for the 21st Century. World Ressource Institute, may 1994.
12. Sierra Research, Inc. "Ozone benefits of alternative Fuels : a reevaluation based on actual emissions data and updated reactivity factors". Report n° SR90.402. Sacramento, California. Avril 1990.
13. DE LUCHI, MARK A ; "Emissions of Greenhouse gases from the use of transportation fuels and electricity". Center for Transportation Research, Argonne National Laboratory, Illinois. 1991.

14. U.S. Congress, Office of Technology Assessment. "Replacing Gasoline, Alternative Fuels for Light-Duty Vehicles". OTA-E-364, sept 1990 ; National Research Council. "Rethinking the Ozone problem in Urban and Regional Air Pollution". Washington D.C.
15. Kenneth S. KURANI, Thomas TURRENTINE, Daniel SPERLING, "Testing électrique véhicule in hybrid households using a reflexive survey". Intitue of Transportation Studies, University of California, Davis. 1996.
16. Groupe d'experts Intergouvernemental pour l'Evolution du Climat : Changements climatiques 1995.
17. Jean-Claude DUPLESSY, Vers un refroidissement de l'Europe. La Recherche, février 1997.
18. Claude LAMURE, Des apports techniques pour le futur des transports quotidiens ? Synthèse INRETS n° 27, septembre 1995.
19. François BADIN, Christophe PRUVOST, Patrick TASSEL, Robert VIDON, Véhicule bi-énergie. INRETS : Rapport LEN n° 9518, novembre 1995.
20. Stéphane BLAIN, l'Océan manque-t-il de fer ? La Recherche n° 287 mai 1996.
21. La pollution atmosphérique d'origine automobile et la santé publique : Société Française de Santé Publique mai 1996.
22. William T. MASON, Urban Kristiansson : Hybrid EVs versus Pure EVs : Which gives greater benefits ? Society of Automotive Engineers 1994.
23. Jean-Pierre GIBLIN, Transports et pollution de l'air : une question controversée, Note Centre Protection Veille Scientifique n° 9, décembre 1997.
24. Groupe Interministériel sur le véhicule électrique : cahiers bleus des rencontres "Véhicules Electriques" de Bordeaux (mars 97), Paris (avril 97).
25. Monique EIFLER : Le développement du système véhicules électriques, pour une approche en sciences sociales - Rapport Ministère de l'Equipement, avril 1997.