



PREMIER MINISTRE



Octobre 2008

## Mission « Véhicule 2030 »

Perspectives concernant  
le véhicule "grand public" d'ici 2030

Jean Syrota, président  
Philippe Hirtzman, coordinateur

Rapports et documents



**Centre d'analyse stratégique**

[www.strategie.gouv.fr](http://www.strategie.gouv.fr)

**Conseil général des mines**

28 septembre 2008

**Mission « Véhicule 2030 »**

**Jean SYROTA**

**Perspectives concernant**

**Le VÉHICULE « grand public »**

**d'ici 2030**

**Jean SYROTA**

Coordinateur : **Philippe HIRTZMAN** (Conseil général des mines)

Rapporteurs :

*Romain BEAUME (Ecole polytechnique)*

*Jean-Loup LOYER (Centre d'analyse stratégique)*

*Hervé POULIQUEN (Centre d'analyse stratégique)*

*Denise RAVET (Centre d'analyse stratégique)*

*Philippe ROSSINOT (Centre d'analyse stratégique)*



# SOMMAIRE

► <b>LES GRANDES ORIENTATIONS DU RAPPORT .....</b>	<b>9</b>
■ <b>Le contexte inédit et durable qui caractérise l’avenir devrait engendrer une rupture dans les habitudes actuelles .....</b>	<b>9</b>
■ <b>Au niveau mondial, pour être supportable, l’inéluctable croissance du parc automobile devra être compensée par la réduction de la consommation unitaire des véhicules, des émissions polluantes et des rejets de gaz à effet de serre .....</b>	<b>9</b>
■ <b>Le carburant liquide est une source d’énergie bien adaptée à la propulsion des véhicules .....</b>	<b>11</b>
■ <b>Les informations économiques disponibles ne permettent pas à elles seules d’anticiper avec suffisamment de précision les évolutions à venir .....</b>	<b>12</b>
■ <b>Les véhicules thermiques actuels peuvent réduire de moitié leur consommation moyennant une optimisation de leurs performances et la réalisation, grâce à des techniques disponibles, de progrès en matière de rendement, de propreté et de flexibilité, ce qui est de nature à leur assurer encore un grand avenir .....</b>	<b>12</b>
■ <b>Le véhicule hybride rechargeable, qui cumule les avantages du thermique et de l’électricité sans en avoir les inconvénients les plus importants, a toutes les chances d’être le véhicule d’avenir .....</b>	<b>13</b>
■ <b>Pour diviser par 2 la consommation énergétique des véhicules « grand public » dans les dix ans à venir, une incitation forte des pouvoirs publics est nécessaire .....</b>	<b>14</b>
<b>Présentation et cadrage de la mission .....</b>	<b>15</b>
► <b>LE CONTEXTE .....</b>	<b>17</b>
1. <b>Éléments historiques et situation actuelle .....</b>	<b>17</b>
1.1. <b>Depuis un siècle, la « saga » de l’automobile a consacré la suprématie du moteur à explosion .....</b>	<b>17</b>
1.2. <b>L’expérience du passé rend peu crédible l’apparition de ruptures technologiques soudaines .....</b>	<b>22</b>
2. <b>Les principaux éléments de contexte à l’horizon 2030 .....</b>	<b>24</b>
2.1. <b>Les crises passées du pétrole n’ont pas significativement modifié le comportement des utilisateurs en matière de mobilité .....</b>	<b>24</b>
2.2. <b>La perspective de prix des hydrocarbures élevés va sans doute impacter durablement le comportement des usagers .....</b>	<b>25</b>
2.3. <b>Le réchauffement climatique domine désormais les politiques énergétiques sur le long terme .....</b>	<b>26</b>
2.4. <b>Le secteur des transports – en particulier l’automobile individuelle – constitue l’un des secteurs clefs conditionnant les évolutions énergétiques .....</b>	<b>26</b>
3. <b>Les stratégies à l’étranger sont diverses .....</b>	<b>30</b>

3.1. Les grandes tendances de l'automobile sont orientées vers l'économie, la sécurité et l'intelligence embarquée .....	30
3.2. Différents gouvernements ont créé des consortiums nationaux pour préparer le véhicule du futur .....	32
3.3. Des stratégies ambitieuses ont été affichées dans quelques pays.....	34
3.4. Les principaux programmes publics étrangers de R&D ont en commun l'électricité et l'hybridation.....	39
<b>4. Le stockage de l'énergie .....</b>	<b>47</b>
4.1. Le stockage de l'énergie dans un véhicule doit respecter des conditions très contraignantes .....	47
4.2. Le carburant liquide aux conditions habituelles est de loin le plus apte au stockage dans un véhicule .....	48
<b>5. Les contraintes environnementales sont de plus en plus rigoureuses dans l'Union européenne.....</b>	<b>52</b>
5.1. Les normes « Euro » limitent les rejets polluants des véhicules particuliers ..	52
5.2. Les émissions de CO <sub>2</sub> des véhicules particuliers sont traitées dans le cadre global de la lutte contre le changement climatique.....	54
5.3. Les propositions européennes de contrôle des émissions de CO <sub>2</sub> des voitures particulières sont controversées.....	55
5.4. L'initiative française du bonus/malus s'est révélée efficace à court terme et serait une incitation permanente puissante si le malus devenait annuel .....	57
<b>► LE VEHICULE DU FUTUR.....</b>	<b>59</b>
<b>6. Le moteur thermique à essence ou diesel, en constante évolution, a encore un bel avenir devant lui.....</b>	<b>59</b>
6.1. Les progrès à attendre des motorisations conventionnelles, en matière de maîtrise de la combustion, sont très nombreux, avec une certaine convergence essence-diesel .....	59
6.1.1. <i>Le « downsizing » est à même de réduire la consommation en conservant la même performance .....</i>	<i>60</i>
6.1.2. <i>Les technologies de combustion, améliorées par l'introduction de l'électronique, pourraient connaître des progrès importants.....</i>	<i>61</i>
6.1.3. <i>Les améliorations du groupe motopropulseur passent aussi par un meilleur pilotage des cycles de combustion, grâce notamment à l'électronique.....</i>	<i>63</i>
6.2. Pour les véhicules thermiques, la gestion de l'électricité au sein du véhicule est une source de réduction de consommation significative.....	65
6.3. Les moteurs thermiques pourraient voir leur consommation réduite de 30 à 40 % par rapport à la situation actuelle .....	65
<b>7. Le véhicule électrique, qui a l'avantage de ne pas émettre directement de gaz polluants, souffre de trop de handicaps pour pouvoir prétendre se substituer massivement au véhicule thermique .....</b>	<b>66</b>
7.1. La voiture électrique est pénalisée par les performances insuffisantes des batteries.....	67

<b>7.2. Une volonté politique forte est nécessaire pour que le véhicule électrique se développe .....</b>	<b>71</b>
<b>7.3. Les caractéristiques techniques des batteries disponibles actuellement appellent encore des développements importants.....</b>	<b>72</b>
7.3.1. <i>Les technologies dominantes actuelles devraient bientôt laisser la place aux technologies à base de lithium .....</i>	<i>72</i>
7.3.2. <i>Les enjeux du stockage de l'électricité dans les batteries résident essentiellement dans l'autonomie, le temps de recharge, la fiabilité et le coût .....</i>	<i>75</i>
7.3.3. <i>La batterie lithium-ion représente l'option d'avenir la plus probable pour le véhicule particulier.....</i>	<i>78</i>
<b>7.4. Le véhicule électrique pur nécessite la création préalable d'une infrastructure pour la recharge des batteries.....</b>	<b>80</b>
<b>8. L'hybridation thermique/électrique représente un compromis séduisant ; l'hybride rechargeable sur le réseau constitue sans doute la solution d'avenir.....</b>	<b>81</b>
8.1. <b>L'hybridation recouvre une grande variété de techniques .....</b>	<b>81</b>
8.2. <b>L'hybridation présente des avantages environnementaux et industriels .....</b>	<b>87</b>
8.3. <b>L'hybride rechargeable cumule les avantages du thermique et de l'électricité sans en supporter les inconvénients les plus pénalisants.....</b>	<b>88</b>
<b>9. Les véhicules à gaz (essentiellement GNV et hydrogène) ne paraissent pas offrir des perspectives pertinentes en France.....</b>	<b>89</b>
9.1. <b>L'air comprimé n'est vraisemblablement pas viable pour la propulsion de véhicules grand public .....</b>	<b>90</b>
9.2. <b>Le gaz naturel ne paraît pas bien adapté au cas de la France .....</b>	<b>91</b>
9.2.1. <i>Le marché européen du GNV est limité .....</i>	<i>91</i>
9.2.2. <i>Le bilan environnemental n'apporte pas d'avantage décisif.....</i>	<i>92</i>
9.2.3. <i>Le GNV bénéficie d'incitations fortes de la part des pouvoirs publics, sans grand effet jusqu'à présent.....</i>	<i>95</i>
9.3. <b>L'hydrogène, un carburant automobile utopique.....</b>	<b>95</b>
9.3.1. <i>Le véhicule à hydrogène n'a d'intérêt qu'avec une pile à combustible.....</i>	<i>96</i>
9.3.2. <i>La production et la distribution de l'hydrogène sont maîtrisées industriellement, mais sont très coûteux .....</i>	<i>98</i>
9.3.3. <i>Le stockage de l'hydrogène à bord du véhicule constitue un défi technologique majeur ..</i>	<i>99</i>
9.3.4. <i>Les verrous technologiques, les coûts considérables de l'ensemble de la filière et les problèmes de sécurité constituent des handicaps insurmontables à l'horizon 2030.....</i>	<i>100</i>
<b>10. Les perspectives de progrès communs à tous types de véhicules.....</b>	<b>101</b>
10.1. <b>Les évolutions conduisant au véhicule du futur résulteront autant de perfectionnements techniques que d'une modification des comportements et d'une meilleure organisation du secteur du transport individuel.....</b>	<b>101</b>
10.2. <b>La diminution des performances dynamiques deviendra incontournable ....</b>	<b>102</b>
10.2.1. <i>Une vitesse de pointe inutilement élevée coûte très cher en consommation .....</i>	<i>103</i>
10.2.2. <i>Une accélération inutilement élevée coûte très cher en consommation.....</i>	<i>105</i>
10.2.3. <i>Vouloir des performances inutilement élevées coûte particulièrement cher en ville .....</i>	<i>106</i>
10.3. <b>Des améliorations incrémentales, notamment sur les auxiliaires, peuvent être sources importantes de réduction de la consommation et des émissions.....</b>	<b>109</b>
10.3.1. <i>L'allègement des véhicules et l'utilisation de nouveaux matériaux.....</i>	<i>109</i>

10.3.2. L'aérodynamisme.....	112
10.3.3. Les pneumatiques.....	113
10.3.4. La climatisation .....	114
10.3.5. Les transmissions et la direction.....	115
10.3.6. L'éclairage.....	116
10.3.7. Les autres équipements auxiliaires (sécurité, électronique, électricité.....)	117
10.3.8. Le cas de la Logan ECO2 : illustration d'une stratégie de réduction de la consommation par une série d'optimisations.....	118
10.3.9. Bilan sur les auxiliaires de consommation .....	119
<b>10.4. Les conducteurs pourront bénéficier d'outils intelligents d'aide à la conduite, pouvant réduire jusqu'à 20 % en moyenne la consommation.....</b>	<b>120</b>
10.4.1. Les économies de carburant liées au bon comportement du conducteur.....	120
10.4.2. Les dispositifs d'aide à la conduite.....	121
<b>► PRECONISATIONS .....</b>	<b>123</b>
<b>11. Préconisations .....</b>	<b>123</b>
11.1. Caractéristiques des véhicules .....	123
11.2. Information relative à la consommation et aux émissions des véhicules .....	124
11.3. Achat et détention des véhicules .....	124
11.4. Utilisation des véhicules.....	124
11.5. Transports urbains .....	125
11.6. Recherche publique .....	125
<b>► ANNEXE : liste des personnes auditionnées.....</b>	<b>127</b>

consommation associés à chaque technologie décrite dans ce chapitre. Il s'agit d'ordres de grandeur prudents.

Réduction potentielle des consommations du réservoir à la roue	Ordre de grandeur du gain potentiel
Downsizing (technologie déjà largement exploitée)	10 à 25 %
Combustion HCCI (pour moteurs diesel)	Réduction de la pollution du moteur (NO <sub>x</sub> )
Combustion CAI (pour moteurs essence)	10 à 15 %
Commande électronique des soupapes	10 %
Taux de compression variable	6 %
Réduction des frottements internes	5 %
Alternateur à haut rendement	2 %
Système de gestion de la charge batterie	2 %

*NB : On rappelle que, lorsque l'on combine 2 gains X et Y, le gain résultant se calcule en multipliant (1-X) par (1-Y) et non pas en additionnant X et Y.*

**Au total, on peut estimer, en tenant compte du fait que la voie du downsizing est déjà largement exploitée, que, durant la décennie 2010, des réductions de 20 % à coup sûr et pouvant aller jusqu'à 40 % de la consommation des moteurs thermiques sont accessibles.**

## **7. Le véhicule électrique, qui a l'avantage de ne pas émettre directement de gaz polluants, souffre de trop de handicaps pour pouvoir prétendre se substituer massivement au véhicule thermique**

L'histoire de l'industrie automobile montre que le véhicule électrique à usage urbain ou périurbain est une idée très ancienne dans l'industrie automobile. Le véhicule électrique a été surpassé par le véhicule équipé d'un moteur à combustion interne au début du XX<sup>e</sup> siècle. Pour autant, de nombreuses tentatives ont été effectuées durant la seconde moitié du XX<sup>e</sup> siècle pour introduire des véhicules électriques. Le véhicule électrique revient aujourd'hui à la mode, dans un contexte de prix des matières premières élevées et de lutte contre le changement climatique.

Jusqu'à la fin du XIX<sup>e</sup> siècle, l'électricité était perçue comme la seule énergie motrice capable de concurrencer la vapeur. Mais l'autonomie très limitée des premières batteries au plomb (inventées par Gaston Planté en 1839) et au nickel-cadmium (1892) a rapidement promu le véhicule électrique au seul rang de véhicule urbain : à l'essence les grandes distances, à l'électricité les courtes !

Ce qui était vrai il y a plus d'un siècle l'est toujours aujourd'hui : techniquement les performances limitées des batteries, leur poids, leur fiabilité, leur longévité et leur coût restent, malgré les progrès réalisés et à venir, de très lourds handicaps. On retrouve les deux raisons principales de la non-viabilité du véhicule électrique qui explique l'échec des tentatives de relance de la voiture électrique des années 1980.

La voiture électrique se définit toujours actuellement sur la base d'un concept éprouvé : une chaîne de traction simple, pas de boîte de vitesse, un système d'énergie embarquée toujours volumineux et surtout lourd (de 100 à 200 kilogrammes) pouvant représenter jusqu'à 20 % du poids total du véhicule, un coût représentant encore aujourd'hui la moitié du coût total (en gros le prix du système de batterie est aujourd'hui équivalent au prix d'un véhicule thermique de même catégorie) ; en revanche l'absence quasi-totale d'émissions polluantes *au niveau de l'utilisation locale* (sous réserve que les dispositifs de chauffage et de climatisation n'utilisent pas des carburants comme le GPL ou l'essence) reste, à côté du silence de fonctionnement, l'avantage principal du véhicule électrique. Des avancées technologiques importantes, telles que celle du « *moteur-roue* » (regroupement au niveau de chaque roue des fonctions de suspension, d'amortissement, de traction et de freinage) ou les nouvelles technologies de batterie au lithium/polymère, seraient de nature à améliorer le bilan du véhicule électrique.

#### *Le concept de moteur-roue développé par Michelin*

Le moteur dans la roue mis au point par Michelin (*Michelin Active Wheel*) présente des caractéristiques singulières qui en font une solution alternative très intéressante pour l'avenir. Le principe de locomotion est en effet radicalement différent : la fonction traction est intégrée dans la roue avec les systèmes de suspension, d'amortissement et de freinage. Le bloc moteur traditionnel est ainsi remplacé par quatre petits moteurs électriques dans chaque roue, d'une masse comprise entre 5 et 7kg et de densité massique de puissance comprise entre 2 kW/kg (moteur refroidi à l'air) et 4 kW/kg (moteur refroidi par liquide). Ainsi le volume disponible du véhicule est complètement libéré pour le logement des batteries et, bien sûr, pour l'espace utile aux passagers et aux bagages.

Si les défis posés par l'utilisation de l'électricité sont les mêmes que pour tout véhicule électrique (autonomie, puissance du moteur, durée de vie de la batterie...), un algorithme sophistiqué doit de plus gérer en temps réel la répartition de l'énergie électrique afin d'assurer en toutes circonstances une bonne tenue de route (état de la chaussée, type de conduite du conducteur, intempéries, virages et accélération...).

Mais **deux incertitudes majeures** affectent toujours le modèle économique du véhicule électrique : d'une part l'incertitude sur **la longévité des batteries**, dont le coût peut représenter la moitié du coût total du véhicule électrique, d'autre part l'incertitude concernant l'évolution de la **taxation de l'électricité** servant à la recharge des batteries.

### **7.1. La voiture électrique est pénalisée par les performances insuffisantes des batteries**

Le développement du véhicule électrique doit surmonter plusieurs obstacles :

- **La performance trop limitée des batteries** dont l'énergie massique est comprise entre 30 et 200 Wh/kg environ, alors que la densité d'énergie des carburants liquides (essence, gazole) dépasse 10 000 Wh/kg, ce qui représente 50 fois plus que les meilleurs accumulateurs actuels. L'écart de rendement entre un moteur électrique et un moteur thermique (80 % – 65 % en tenant compte du rendement des opérations de charge-décharge des batteries – contre 25 %) est insuffisant pour donner aux véhicules électriques des autonomies comparables aux véhicules thermiques.

- **La durée nécessaire pour recharger les batteries** : sur une prise de courant ordinaire (220 V, 15A), il faut en effet environ 6 heures pour recharger un véhicule électrique. Cela

s'explique par la très faible puissance que délivre une prise électrique standard (environ 3 kW). A titre de comparaison, lorsque l'on fait le plein d'essence à une station-service, le véhicule reçoit 50 litres en 5 minutes. La puissance équivalente de recharge est alors de 6 MW thermiques ou 1,5 MW utiles si l'on tient compte du rendement thermique du moteur. *Il y a donc un facteur d'environ 500 entre le débit d'énergie d'une prise électrique et le débit d'une pompe à essence.* Cette différence serait réduite par l'utilisation de prises de charge qui délivrent 35 kW, soit un rapport de 1 à 40 par rapport à une pompe à essence. L'unique dispositif permettant de transférer autant d'énergie à un véhicule électrique que dans le cas d'un véhicule thermique est *l'échange de batteries*, opération qui est aujourd'hui utilisée pour des bus électriques (pour lesquels l'organisation des volumes permet un maniement plus aisé) et qui est en cours de mise au point pour les voitures électriques (en particulier dans le cadre du projet Renault en Israël décrit plus loin).

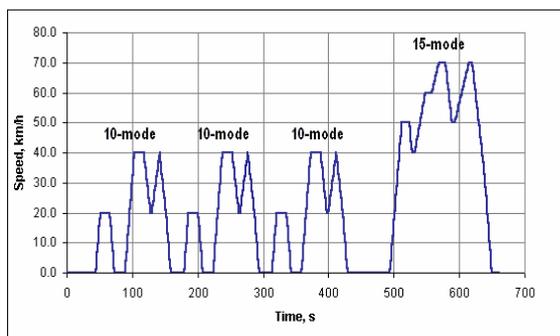
- ***L'incertitude sur l'autonomie des véhicules électriques*** : cette incertitude n'est pas nouvelle et s'explique par le caractère incomplet des tests normalisés (cycle NEDC pour l'Europe).

Le cycle NEDC (« New european driving cycle ») utilisé en Europe, entre autres, pour évaluer les niveaux d'émission des moteurs, correspond à un cycle de conduite d'une durée de 20 minutes comprenant 4 cycles répétés de type urbain (ECE-15) et un cycle de conduite sur route (EUDC) ; il est censé être représentatif de l'utilisation usuelle d'une voiture en Europe. D'autres tests normalisés utilisent des cycles d'homologation différents, tel le mode « 10-15 » utilisé au Japon et sommairement décrit ci dessous ; ce cycle, d'une durée plus courte (12 minutes de conduite), ne comprend que 3 cycles de conduite urbaine et se fonde sur une vitesse moyenne plus faible en ville comme sur route.

Ces tests ne prennent pas en compte **la consommation des accessoires (phares, essuie-glaces, dégivrage arrière...) et surtout le chauffage ou le refroidissement de l'habitacle.** Or la gestion thermique de l'habitacle peut réduire très largement l'autonomie d'un véhicule électrique. Des calculs effectués par L'Ecole des mines de Paris, l'ADEME et l'INRETS ont montré que la climatisation automobile pouvait absorber entre 1 kW (air extérieur à 25°C, température de consigne à 20°C) et 3 kW (air extérieur à 40°C, température de consigne à 20°C). De plus, le chauffage en hiver s'avère être un gros consommateur d'énergie, dont la consommation est supérieure à la climatisation dans le cas de pays très froids (cas de températures extérieures fortement négatives). Le chauffage d'un véhicule électrique pose un problème spécifique car, contrairement au véhicule thermique, il ne dispose pas d'une source de chaleur gratuite (gaz d'échappement). Ainsi, on peut constater que la gestion thermique peut engendrer des surconsommations telles qu'elles vont réduire significativement l'autonomie des véhicules.

En plus de la régulation thermique de l'habitacle, il faut tenir compte de tous les autres équipements consommateurs d'énergie, qui vont des essuie-glaces au chauffage de lunette arrière, la radio, l'éclairage. Ces consommateurs, qui ne sont pas non plus pris en compte dans les tests d'homologation classiques, représentent en moyenne 0,6 kW et peuvent atteindre plus de 1 kW (source : Automotive Handbook, Bentley Publishers).

**Ainsi, entre la consommation théorique d'un véhicule électrique, tel que mesurée sur un cycle NEDC, et la consommation réelle, on doit tenir compte de l'impact potentiel d'un ensemble d'équipements qui peuvent nécessiter une puissance électrique d'environ 2,5 kW dans des cas d'utilisation de climatisation et jusqu'à 4 kW dans des conditions extrêmes.**



*Cycle d'homologation japonais « 10-15 »*

La vitesse moyenne sur ce cycle est de 25 km/h. Cela signifie que le véhicule i-mev nécessite une puissance moyenne de 2,5 kW pour sa traction.

On peut donc conclure qu'en usage réel urbain, **l'autonomie d'un véhicule électrique pourrait être réduite de moitié**, dans le cas où les auxiliaires nécessiteraient 2,5 kW. Ces calculs ne tiennent pas compte d'éventuels progrès qui pourraient être faits sur les systèmes de climatisation, telle l'introduction de pompes à chaleur, ou encore des autres améliorations que les constructeurs devront apporter à leurs véhicules pour réduire leur consommation électrique.

- **Un coût élevé** : aujourd'hui le véhicule électrique doit supporter un coût environ double de celui d'un véhicule thermique conventionnel. L'une des raisons vient du fait que le véhicule électrique nécessite l'introduction d'une batterie de grande capacité (au minimum une dizaine de kWh) dont le coût est au minimum d'environ 500 \$/kWh, ce qui en fait un composant qui compte pour quasiment 10 000 \$ dans le prix de revient d'un véhicule. Par ailleurs, les progrès technologiques et les économies d'échelles liés à des productions en série sont aujourd'hui difficiles à anticiper tant la taille future du marché est incertaine.

- **La nécessité de construire l'infrastructure nécessaire à l'alimentation des véhicules électriques**. Ce n'est pas tant un problème technologique (prises de charges...) qu'un problème d'investissements : en effet, le véhicule électrique est à vocation urbaine ou périurbaine, et nécessite au minimum un très large déploiement de prises de recharge qui permette à des utilisateurs de recharger leur véhicule durant la nuit mais aussi durant la journée s'ils le souhaitent. Cela supposerait donc d'équiper les places de stationnement public, les parkings souterrains, les garages (pour ceux qui ont une maison), mais aussi plus généralement les parkings d'entreprise, voire les parkings de lieux de stationnement tels les supermarchés. Un tel réseau de surface s'impose donc et la multiplication des bornes publiques à carte (sujet sur lequel travaille actuellement EDF) pose des problèmes d'emprise au sol, de sécurité (électrocution, malveillance...) et, plus largement, de standardisation : un déploiement de véhicules électriques nécessite que des acteurs aussi nombreux que des constructeurs automobiles, énergéticiens, collectivités locales définissent des standards pour la connectique, les compteurs électriques, car chaque voiture doit pouvoir se recharger indifféremment sur n'importe quelle prise. Il ne faut pas sous-estimer la difficulté d'un tel processus : les exemples abondants sur les guerres de standards dans l'industrie électronique (standards pour les SVS, la télévision numérique, l'internet sur téléphone portable...) montrent que ces processus sont généralement longs en raison du grand nombre d'acteurs impliqués.

- **L'impact dominant des conditions de production de l'électricité**. Il est important enfin de noter que, si l'impact environnemental du véhicule électrique est très faible sur son lieu d'utilisation (le véhicule électrique pourrait débarrasser les centres-villes des oxydes d'azote,

On peut analyser l'impact de telles surconsommations sur un véhicule électrique. On prend ici, à titre d'exemple, le cas d'un véhicule dont les tests d'autonomie sur cycle normalisé ont été effectués. Il s'agit de la Mitsubishi i-mev, actuellement en test au Japon et dont la commercialisation débutera en 2009. Il s'agit d'un petit véhicule urbain (en Europe ce véhicule ferait partie du segment dit des « petites citadines » d'une longueur comprise entre 2,5 et 3,6 m), d'une masse de 1080 kg. Equipé d'un moteur de 47 kW de puissance, ce véhicule a une autonomie de 160 km en cycle normalisé « 10-15 » (norme japonaise) et est équipé de batteries de 16 kWh. Le profil du cycle d'homologation « 10-15 » est représenté ci-contre ; on peut constater qu'il correspond à un trajet de type urbain/péri-urbain.

des particules fines, du bruit des automobiles...), le véritable enjeu environnemental se situe **en amont** lors de la fabrication de l'électricité. La prédominance de la production électronucléaire en France ne doit pas faire oublier que, dans la plupart des autres pays au monde, une part significative de l'électricité provient de centrales thermiques fonctionnant au charbon, au lignite, au gaz ou au fioul. De nombreux calculs permettent de comprendre dans quels cas le bilan CO<sub>2</sub> d'un véhicule électrique est meilleur que celui d'un véhicule thermique. Le tableau suivant, proposé par EdF, donne quelques ordres de grandeur et montre que, si le bilan global est favorable en France au véhicule électrique par rapport à un véhicule essence/diesel moyen, il l'est tout juste à l'échelle européenne et il ne l'est plus à l'échelle mondiale.

<b>Bilan « du puits à la roue » pour une voiture particulière en gCO<sub>2</sub>/km</b>			
<b>Source d'énergie</b>	<b>Du puits au réservoir<sup>1</sup></b>	<b>Du réservoir à la roue<sup>2</sup></b>	<b>Emissions totales</b>
<i>Essence / diesel</i>	<i>20 à 35</i>	<i>120 à 180</i>	<i>140 à 210</i>
Electricité - mix France	15 à 20	0	15 à 20
Electricité - mix Europe	90 à 110	0	90 à 110
Electricité - mix monde	120 à 140	0	120 à 140

Source: EDF

<sup>1</sup> Correspond aux dépenses énergétiques nécessaires pour disposer du stock d'énergie embarqué

<sup>2</sup> Correspond aux dépenses énergétiques prélevées dans le stock d'énergie embarqué

*Ce genre de comparaison doit cependant être interprété avec beaucoup de prudence :*

- D'une part, *cette comparaison essence/diesel et électricité n'est pas équitable* car elle ne tient pas compte des différences de performances (vitesse de pointe, puissance) entre les deux types de véhicules : un véhicule électrique dont la vitesse de pointe est couramment aujourd'hui limitée à 110-120 km/h, n'a pas le même usage qu'une berline à propulsion conventionnelle pouvant atteindre les 160-250 km/h. Dit autrement, une voiture à essence, utilisée comme l'est une voiture électrique, verrait sans doute ses caractéristiques de consommation et d'émissions gazeuses singulièrement modifiées. Une comparaison équitable conduirait vraisemblablement à diviser à peu près par deux les émissions des véhicules essence/diesel. Il en résulte qu'un véhicule thermique de petite taille, ayant une puissance faible (donc des performances routières comparables à celles d'un véhicule électrique) et une consommation très réduite serait favorable du point de vue des émissions de CO<sub>2</sub> et pourrait prendre une part du marché.
- D'autre part, *ces chiffres sont tout à fait théoriques* puisqu'ils ne prennent pas en compte deux réalités importantes : les climatisations consomment beaucoup et les centres-villes sont embouteillés. En effet, la consommation d'un véhicule électrique est modifiée lorsque la climatisation est sollicitée, de même que la consommation d'un véhicule thermique est sensible au niveau de congestion du trafic.

Il faut donc admettre que la balance entre les deux bilans n'a rien d'évident (*sauf en France où l'électrique dispose d'un avantage comparatif grâce à son parc de production hydraulique et nucléaire*) et que l'intérêt, sur le plan des émissions globales de CO<sub>2</sub>, du véhicule électrique devrait faire l'objet d'études beaucoup plus approfondies. Mais, en tout état de cause, il paraît peu probable que soient produites en grandes quantités des voitures qui seraient spécifiquement françaises.

## **7.2. Une volonté politique forte est nécessaire pour que le véhicule électrique se développe**

Aujourd'hui, le contexte nouveau remet l'actualité sur les véhicules électriques urbains : prix des matières énergétiques élevés, politiques de lutte contre les gaz à effets de serre et les pollutions locales, normes environnementales plus contraignantes... Les qualités d'un usage urbain du véhicule électrique expliquent pourquoi cette option revient aujourd'hui sur le devant de la scène ; on peut même dire qu'il a pris la relève de la pile à combustible et de l'hydrogène comme idée à la mode.

**Ainsi, des initiatives technologiques, commerciales et politiques voient le jour. Forts des échecs passés, les acteurs interviennent avec une plus grande prudence et tentent d'aborder la question des infrastructures, conscients que les difficultés de stockage de l'énergie électrique brident l'utilisation du véhicule électrique.**

Le véhicule électrique bénéficie d'ores et déjà d'une incitation implicite du fait des méthodes de calcul des émissions de CO<sub>2</sub> de l'ensemble des gammes de véhicules commercialisés par les constructeurs : le véhicule électrique étant comptabilisé pour zéro émission, son développement fait artificiellement diminuer les chiffres moyens d'émission et *son apparition dans un catalogue constructeur lui permettra de respecter plus facilement les objectifs globaux* attendus en matière d'émission de CO<sub>2</sub>.

**Seule une volonté politique forte et constante, au niveau tant de l'Etat (fiscalité, politique tarifaire de l'électricité) que des collectivités locales (financement des infrastructures, limitations de la circulation dans les centres-villes, péages urbains), sera de nature à provoquer la validation d'un modèle économique durable pour que le véhicule tout électrique trouve une place dans les décennies à venir. Cette place sera probablement minoritaire (les acteurs les plus optimistes parlent de 15 % du parc automobile) et limitée à l'usage urbain ou périurbain, en priorité dans les zones à forte contrainte environnementale locale et pour des flottes captives.**

L'Etat d'Israël a fourni en 2008 un exemple récent d'initiative politique forte dans le domaine du véhicule électrique. Cette expérience, que l'on peut qualifier d'expérimentation à grande échelle du véhicule électrique est brièvement décrite ci-dessous.

### ***Le projet « Better place » en Israël***

La création d'un parc de véhicule électrique en Israël où circulent un million de véhicules et où 90 % des automobilistes effectuent en moyenne moins de 70 km par jour, devrait voir le jour d'ici 2011-2012. Le projet « Better Place », dont Renault est l'un des principaux partenaires, sera soutenu par une politique fiscale rendant attractif l'achat des véhicules : la taxe à l'achat de 79 % sera ramenée à 10 % jusqu'en 2014, puis à 30 % à partir de 2019 – niveau de taxe pour les véhicules hybrides –, sauf si la part de marché des véhicules électriques atteint 20 % d'ici 2019. Les voitures seront des adaptations de modèles existants (Mégane) et seraient dotées de batterie lithium-ion fournie par Nissan et NEC. Les véhicules devraient avoir une autonomie d'une centaine de kilomètres dans des conditions d'utilisation locales, c'est-à-dire avec une forte utilisation de la climatisation.

Le modèle économique est calqué sur celui de la téléphonie cellulaire puisque les profits reposeront plus sur les services que sur l'acquisition du matériel. L'automobiliste achèterait sa voiture, louerait la batterie et se verrait facturer les services de maintenance et de charge (les frais mensuels de batteries sont estimés à 60 €). D'ici 2012, 500 000 points de charge devraient être installés sur le territoire ainsi que plusieurs centaines de stations d'échange des batteries. Le marché israélien, une fois stabilisé, est estimé à environ 30 000 véhicules par an. Une initiative analogue est prévue au Danemark.

Un accord de principe a été conclu au Portugal, afin d'étudier les conditions de faisabilité d'un déploiement massif de véhicules électriques dans ce pays. Pour Israël, la motivation fondamentale est avant tout l'indépendance énergétique du pays dans un contexte particulier que l'on ne retrouve pas nécessairement dans les pays européens et qui est à l'origine de l'engagement politique et budgétaire fort du gouvernement.

Certaines agglomérations envisagent de pénaliser voire d'exclure du centre ville la circulation de véhicules thermiques. La ville de Londres est, à ce titre, un pionnier. Seuls les véhicules « propres », label dont le véhicule électrique bénéficie, seraient autorisés à pénétrer sur le réseau d'infrastructure routière à l'intérieur d'un périmètre central défini. L'instauration d'un péage urbain pourrait alors favoriser le marché des véhicules électriques.

### **7.3. Les caractéristiques techniques des batteries disponibles actuellement appellent encore des développements importants**

Pour répondre au problème d'autonomie, les recherches se sont orientées depuis toujours vers l'augmentation de la densité d'énergie des batteries. La filière plomb, technologie mature, a montré ses limites. D'autres couples électrochimiques ont été développés et pourraient favoriser la diffusion des véhicules électriques.

On distingue généralement trois familles d'accumulateurs :

- les accumulateurs en milieu aqueux : systèmes acides (batteries au plomb) ou alcalins (nickel-cadmium ; nickel-hydrure métallique...),
- les accumulateurs en milieu organique en phase liquide (lithium-phosphate ; lithium-ion : sels de lithium dissous dans un solvant organique),
- les accumulateurs en milieu polymère (lithium métal polymère).

Les batteries dites « chaudes », notamment de marque Zebra (Suisse), ont des caractéristiques très particulières car la cathode (aluminium et chlorure de sodium) et l'anode (sodium) doivent être maintenues à l'état liquide par chauffage environ 300°C), la paroi intermédiaire en céramique servant à la fois de séparateur et de conducteur ionique.

#### **7.3.1. Les technologies dominantes actuelles devraient bientôt laisser la place aux technologies à base de lithium**

L'état de l'art des technologies disponibles ou en cours de mise au point est très contrasté selon la nature des couples électrochimiques.

##### **► Plomb-Acide (Pb)**

Les batteries au plomb ont des performances limitées par une importante modification morphologique des matières actives au cours du cyclage qui en réduit le taux d'utilisation. Elles ont néanmoins l'avantage d'une production industrielle de masse depuis bientôt un siècle. Leur coût, nettement inférieur à celui des autres technologies, reste le principal attrait pour les constructeurs automobiles. La dernière Citroën C3 équipée d'un alterno-démarrreur utilise encore une batterie au plomb. L'augmentation du rendement des matières actives ayant jusqu'à ce jour été une butée, les améliorations possibles pourraient venir de nouvelles architectures internes (pseudo bipolaire, bipolaire) et de nouveaux procédés de mise en œuvre (compression, mousses métalliques).

Les batteries au plomb équipent aujourd'hui la quasi-totalité des petits véhicules électriques (chariots élévateurs, véhicules de golf, fauteuils roulants...), mais sont peu efficaces pour fournir l'énergie de puissance pour des véhicules routiers : les batteries au plomb qui équipent actuellement les voitures ont plus une vocation de réserve énergétique, spécialisée dans le stockage/déstockage de pointe.

### ► **Nickel-Cadmium (Ni-Cd)**

Longtemps restées du domaine des hautes technologies (aéronautique, télécommunications), les batteries Ni-Cd sont passées au domaine grand public avec l'outillage électroportatif. Elles ont connu en France un important développement avec les véhicules électriques du groupe PSA (Citroën AX, Saxo, Peugeot 106...) puis de Renault (Clio...). Réputées performantes et fiables, les batteries Ni-Cd souffrent, selon le mode d'utilisation, d'un « effet mémoire » réduisant la capacité utilisable. L'effet est cependant réversible et un cyclage approprié permet de retrouver la capacité initiale. Ce sont les réglementations européennes sur les métaux lourds qui ont condamné l'usage de cette technologie qui emploie de grandes quantités de cadmium, aujourd'hui interdit.

### ► **Nickel-métal hydrure (Ni-MH)**

La nature toxique du cadmium a conduit au développement du couple nickel-hydrure métallique pour la traction. L'utilisation d'un hydrure métallique pour l'électrode négative entraîne un surcoût mais apporte aussi une meilleure capacité. Les batteries Ni-MH tolèrent moins bien les surcharges et les températures élevées que les batteries Ni-Cd (risque d'explosion et d'incendie). Elles souffrent d'autres points faibles comme la difficulté de détecter la fin de charge, la durée de vie encore incertaine et leur prix. Mais en raison de leur capacité à fournir une puissance élevée et à assurer un nombre important de cycles, ces batteries sont largement utilisées pour les applications hybrides à forts régimes et faible amplitude de cyclage.

Panasonic a développé pour Toyota plusieurs générations d'accumulateurs Ni-MH de puissance. La seconde génération d'éléments prismatiques qui équipe le véhicule hybride Prius II fait référence en termes de performances et de fiabilité. La garantie offerte par le constructeur sur ce composant est de 8 ans. Le même type de batterie équipe l'hybride Honda Civic IMA. D'autres constructeurs comme GP Batteries proposent des produits aux performances un peu moins élevées mais à un coût nettement inférieur. En France, la SAFT propose, pour un coût encore élevé, une gamme Ni-MH basée sur les développements de SAFT USA.

### ► **Lithium-ion**

Des accumulateurs lithium-ion, dotés d'une électrode négative en carbone et d'une électrode positive à base d'oxyde de cobalt, ont été développés spécifiquement pour les applications automobiles. En France, aux Etats-Unis comme au Japon, des véhicules électriques équipés de telles batteries ont déjà démontré des performances jusqu'alors jamais atteintes.

Contrairement aux couples précédents, les batteries au lithium utilisent un électrolyte non aqueux. Ceci constitue un avantage en éliminant la réaction parasite de décomposition de l'eau. Cependant, la formulation d'un électrolyte est rendue délicate par un compromis difficile à réaliser. Outre une conductivité élevée dans la gamme des températures ambiantes, l'électrolyte constitué d'un sel de lithium en solution dans un solvant organique doit présenter une bonne stabilité chimique et thermique vis à vis des autres composants de la cellule. *Ces incertitudes, non encore levées à ce jour pour des batteries de grande taille (risque d'échauffement voire d'incendie), ont amené Toyota, contrairement à ses intentions, à continuer d'équiper sa prochaine gamme Prius III de batteries Ni-MH.*

En France, cette technologie est développée par la SAFT, à Poitiers pour les éléments de faible capacité, à Bordeaux pour les éléments de traction. Principalement pour des raisons de coût, ces accumulateurs sont aujourd'hui encore fort peu répandus. Parallèlement, on observe en Asie (Chine et Japon) un développement assez rapide de cette technologie porté par les marchés du portable et des véhicules légers (deux roues et voiturettes). La production en grande quantité permettra une baisse de coûts.

### ► *Lithium-ion Phosphate*

L'électrode positive d'une batterie lithium-ion est ici remplacée par un phosphate de métal, généralement du phosphate de fer. En plus des performances élevées et de la bonne tenue en cyclage des batteries lithium-ion, cette technologie à l'avantage d'une meilleure sécurité intrinsèque et d'un coût réduit du matériau. Outre leur grande disponibilité, les phosphates présentent une excellente stabilité lors des sollicitations électriques excessives et lors des élévations de température (stable jusqu'à 350°C). En raison d'une tension élémentaire plus faible, l'énergie spécifique de ce couple (120 à 140 Wh/kg) est un peu inférieure à celle du lithium-ion à base de cobalt. La cyclabilité est quant à elle très élevée (2000 cycles à 80 % de la capacité nominale). A titre d'exemple, aux Etats-Unis, la société Valence technology, basée au Texas, commercialise déjà ce type d'accumulateur tout comme la société BYD en Chine. Des essais effectués par la direction des études et recherches d'EdF confirment les performances annoncées.

### ► *Lithium-métal polymère*

L'utilisation d'une électrode négative constituée de lithium métallique permet théoriquement des capacités nettement supérieures à celles obtenues avec le carbone. Outre l'avantage d'un système entièrement solide (risque d'explosion faible), sa constitution interne, composée d'électrodes minces superposées autour d'un électrolyte solide en polymère extrudé permet d'envisager un coût de production avantageux ; par ailleurs on attend des packs près de 5 fois plus légers que des batteries au plomb correspondantes, une recyclabilité presque totale en fin de vie et une durée de vie estimée à 10 ans. Ce type de batterie nécessite cependant une température de fonctionnement proche de 80 °C pour assurer une conductivité suffisante. L'inconvénient majeur lié à l'électrode de lithium métallique est l'apparition, au cours du cyclage, de dendrites responsables de courts-circuits internes. En France, la société BatScap, qui appartient au groupe Bolloré, développe cette technologie et a acquis en mars 2007 les actifs de la société canadienne Avestor, qui était la première à commercialiser des modules de forte capacité.

### ► *Sodium - Chlorure de Nickel (Zebra)*

Le principe de base de la famille de batteries de type « chlorure de sodium-métal » dont fait partie la batterie Zebra a été breveté en 1975 par J.Werth. Depuis, cette technologie a subi une longue série d'améliorations pour atteindre aujourd'hui une performance, en termes de densité d'énergie, deux fois supérieures à celle des batteries nickel-cadmium. L'élément déterminant pour les performances et la fiabilité est l'électrolyte en céramique.

Cette technologie a été spécifiquement mise au point pour les applications véhicules électriques en matière de transport lourd et de transport public. La température interne de fonctionnement est comprise entre 270°C et 350°C. Les éléments sont enfermés dans un caisson isolé dont les parois externes ont une température de l'ordre de 30°C. Les principaux avantages de la technologie Zebra sont une densité d'énergie élevée (120 Wh/kg) et un bon rendement énergétique. La puissance est par contre pénalisée par la conductivité réduite de la céramique électrolyte.

Plus de 200 batteries Zebra équipent en Italie des autobus Autodromo électriques et hybrides, dont certains sont en service depuis 1998. Irisbus a choisi les batteries Zebra pour la version tout électrique de son minibus Europolis. En France, des bus électriques équipés de batteries Zebra sont en circulation à Lyon depuis fin 2004. Dans le domaine des utilitaires et des véhicules légers, les batteries Zebra équipent des utilitaires Daimler Chrysler et MicroVett. Think Nordic utilise des batteries Zebra pour son nouveau modèle de voiture électrique.

Compte tenu de l'énergie spécifique demandée, afin d'améliorer toujours davantage l'autonomie, les couples au lithium ou les technologies de type Zebra (Na-NiCl<sub>2</sub>) devraient progressivement prendre le dessus sur les accumulateurs alcalins (Ni-Cd, Ni-MH), au fur et à mesure que les problèmes techniques et économiques (durée de vie, sécurité, coût...) sont en

passé d'être résolu. La technologie Zebra, compte tenu de son handicap de puissance et des incertitudes qui pèsent toujours sur l'adéquation de son mode de fonctionnement à des voitures particulières (température), paraît cependant plus dédiée aux véhicules plus lourds (livraison de fret, transport collectif...) qui peuvent beaucoup mieux accepter une configuration d'éléments en parallèle sous caisse (insertion d'éléments de sécurité en cas de mise hors service d'une partie de la batterie, conditions de refroidissement). D'ailleurs aucun constructeur ne l'annonce comme filière d'avenir pour les voitures « grand public ».

### ***7.3.2. Les enjeux du stockage de l'électricité dans les batteries résident essentiellement dans l'autonomie, le temps de recharge, la fiabilité et le coût***

#### **► La caractérisation d'une batterie**

La batterie électrochimique est l'organe qui doit répondre aux nécessités de stockage, de continuité et de fiabilité d'approvisionnement du véhicule en énergie électrique. L'accumulateur restitue sous forme électrique l'énergie produite par des réactions électrochimiques d'oxydation ou de réduction aux interfaces de deux électrodes séparées par un électrolyte. Celles-ci cèdent (anode) ou absorbent (cathode) des électrons. Les ions libérés circulent alors dans l'électrolyte.

Quatre caractéristiques définissent la technologie d'un accumulateur :

- sa densité d'énergie massique (ou énergie spécifique) : exprimée en Wh/kg, elle correspond à la quantité d'énergie stockée par unité de masse ;
- sa densité d'énergie volumique, en Wh/l : elle indique la quantité d'énergie stockée par unité de volume ;
- sa densité de puissance : exprimée en W/kg, elle correspond à la puissance que peut délivrer une unité de masse ;
- sa « cyclabilité » : exprimée en nombre de cycles, correspondant à une charge et une décharge, elle caractérise la durée de vie de l'accumulateur, soit le nombre de fois où il peut restituer le même niveau d'énergie (après chaque recharge).

#### **► Comparaison des caractéristiques techniques des différentes technologies disponibles ou envisagées**

Le tableau ci-dessous résume les principales caractéristiques des batteries utilisées ou à l'étude pour la traction d'un véhicule terrestre. Les couples nickel-hydrure métallique (Ni-MH) et lithium-ion (Li-ion) présentent des énergies massiques et des densités énergétiques très supérieures à celles des batteries traditionnelles plomb ou nickel-cadmium (Ni-Cd). Ces couples électrochimiques sont très utilisés dans les appareils nomades portatifs (téléphones mobiles, ordinateurs portables...). Mais le passage aux puissances et aux tailles de batteries exigées pour la motorisation automobile pose des problèmes de fonctionnement et de fiabilité non encore résolus à ce jour. Le type Zebra, qui offre une densité énergétique intéressante, a pour l'instant vu son développement limité à l'équipement d'autobus et de véhicules routiers lourds.

## Comparaison des caractéristiques techniques des accumulateurs

	Plomb	Ni-Cd	Ni-MH	ZEBRA	Lithium-phosphate	Li-ion	Lithium-polymère
<b>Energie spécifique (Wh/kg)</b>	30-50*	45-80	60-110	120	120-140	150-190	150-190
<b>Densité d'énergie (Wh/litre)</b>	75-120	80-150	220-330	180	190-220	220-330	220-330
<b>Puissance en pointe (W/kg)</b>	Jusqu'à 700		Jusqu'à 900	200	Jusqu'à 800	Jusqu'à 1500	Jusqu'à 250
<b>Nombre de cycles</b>	400-600 <sup>1</sup> 1200 <sup>2</sup>	2000	1500	800	> 2000	500-1000	200-300
<b>Autodécharge par mois</b>	5 %	20 %	30 %	12% par jour	5 %	10 %	10 %
<b>Tension nominale d'un élément</b>	2 V	1,2 V	1,2 V	2,6 V	3,2 V	3,6V	3,7V
<b>Gamme de température de fonctionnement</b>	- 20°C à 60°C	- 40°C à 60°C	- 20°C à 60°C	- 20°C à 50°C	-0°C à 45°C (charge) -20°C à 60°C (décharge)	- 20°C à 60°C	0°C à 60°C
<b>Avantages</b>	Faible coût	Fiabilité, performance à froid	Très bonne densité énergétique	Très bonne densité énergétique, bonne cyclabilité	Très bonne densité d'énergie, sécurité, coût, cyclabilité	Excellente énergie et puissance	Batteries minces possibles
<b>Inconvénients</b>	Faible énergie, mort subite	Relativement basse énergie, toxicité	Coût des matériaux de base, danger en cas de température élevée	Puissance limitée, auto-consommation	Charge à température positive	Sécurité des gros éléments, coût	Performance à froid, coût
<b>Coûts indicatifs (€/kWh)<sup>3</sup></b>	200 à 250 <sup>1</sup> 200 <sup>2</sup>	600	1500 à 2000	800 à 900	1000 à 1800	2000	1500 à 2000

*Source : « le stockage électrochimique », dossier de l'ADEME, 2005 (Virginie SCHWARZ - Bernard GINDROZ)  
Données techniques partiellement actualisées à 2007*

\* Les chiffres extrêmes des fourchettes correspondent à des tailles différentes d'éléments (les gros éléments ayant en général des énergies plus élevées) ou à des conceptions pour des applications différentes.

(1) conception étanche

(2) conception tubulaire

(3) par kWh de capacité de la batterie et pour les volumes actuels de production

On peut comparer le bilan de ces différentes technologies pour fournir une autonomie de 100 km à une voiture (sans utilisation des équipements autres que le moteur de traction). Les calculs sont effectués avec une consommation-type de 150 Wh/km (ce qui correspond à une consommation de 50 % supérieure à celle typiquement réalisée sur un cycle d'homologation par un véhicule citadin). Ces chiffres sont très théoriques, car ils ne tiennent pas compte en

particulier de la diminution de la capacité des batteries au fur et à mesure de l'augmentation du nombre de cycles effectués.

<i>Comparaison des technologies de stockage électrochimique pour une autonomie de 100 km</i>							
Technologies	Plomb Acide	Ni-Cd	Ni-MH	Li-ion	Li-ion Phosphate	Li-métal polymère	Zebra
Masse (kg)	300-500	187-333	136-250	78-100	107-125	78-100	125
Volume (l)	125-200	100-187	45-68	45-68	68-78	45-68	83
Prix (€)	3 000 - 3 750	9 000	22 500 - 30 000	30 000	15 000 - 27 000	22 500- 30 000	12 000- 13 500
Coût (€) par cycle	13-16	15	12-17	15	10-19	12-17	14-15

Ces chiffres sont fournis à titre indicatif, dans la mesure où ne sont définis ni le type de véhicule (et donc sa masse), ni le standard utilisé pour mesurer l'autonomie (type de conduite).

Ce calcul fournit néanmoins des ordres de grandeur ; il montre qu'en dépit d'un siècle d'application dans l'automobile, les batteries au plomb sont trop lourdes pour être utilisées dans des véhicules hybrides ou électriques. Ensuite, la technologie nickel-cadmium a fait l'objet d'une directive européenne (2006/66/CE) qui en a interdit l'usage pour les applications portables, en raison de la pollution qu'elle engendre.

### ► Les minima requis d'un véhicule électrique terrestre

On considère un véhicule électrique correspondant au standard actuel de performances (entre 70 et 100 kW de puissance, entre 80 et 110 km/h de vitesse de pointe).

Nos modes de mobilités imposent qu'un véhicule électrique – et donc sa batterie – offre au moins les caractéristiques suivantes :

- une autonomie de l'ordre de 200 à 300 km, soit une énergie et une puissance massiques importantes (de l'ordre de 200 Wh/kg et 400 W/kg) et une densité énergétique de 300 Wh/l pour rendre possible l'intégration de l'accumulateur dans le véhicule ;
- une énergie embarquée suffisante : de 10 à 100 kWh selon la taille du véhicule ;
- une durée de vie de 10 ans soit une « cyclabilité » élevée (supérieure à 600) ;
- une plage de température de fonctionnement adaptée aux conditions extérieures d'utilisation (- 40°C à plus de + 50°C) ;
- une capacité de recharge rapide, du moins partiellement (au moins 80 % de la capacité nominale).

En résumé, on peut estimer la quantité d'énergie à stocker en fonction des kilomètres à parcourir (autonomie requise) et de la masse en considérant une consommation d'environ 135 Wh/tonne/km et une puissance de 40 kW/tonne.

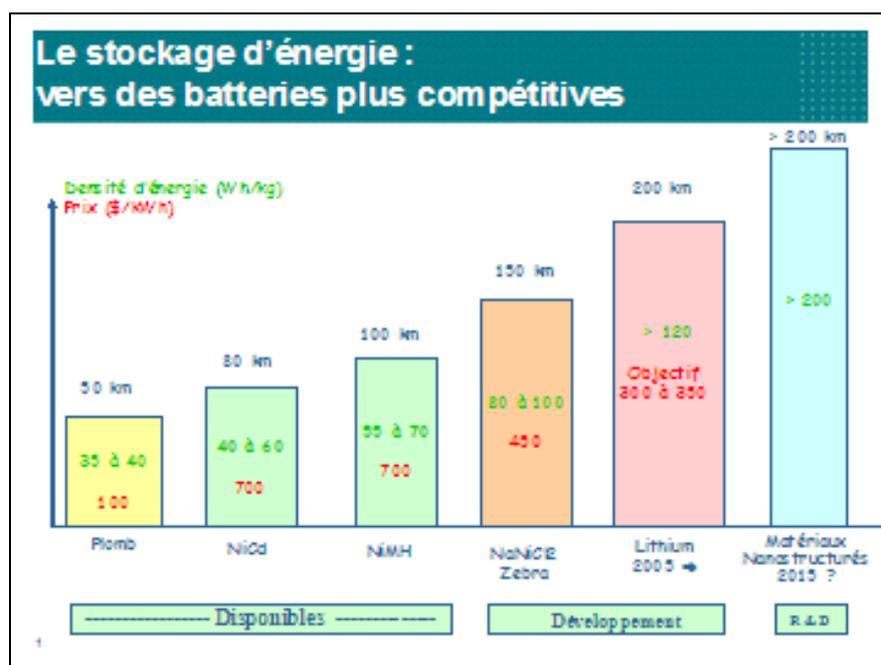
De la performance de la batterie dépend le fonctionnement des différents organes du véhicule. Outre les contraintes de fonctionnement énoncées ci-dessus (autonomie, temps de charge, durée de vie), elles doivent répondre :

- à des contraintes d'utilisation : chauffage et/ou refroidissement de la batterie en fonction du climat du pays dans lequel le véhicule est utilisé ;
- à des contraintes de fabrication : recyclage et pollution (par exemple batteries Ni-Cd), coût élevé de certains composants de la batterie (nickel...). Actuellement, le risque serait que soient mises sur le marché des batteries qui stockent des quantités d'énergie suffisantes, mais dont la probabilité d'explosion ou d'incendie soit trop élevée.

Les progrès technologiques de la batterie doivent répondre aux contraintes inchangées depuis plus d'un siècle. Il s'agit donc d'œuvrer pour :

- une augmentation de l'autonomie : augmentation de l'énergie spécifique,
- une augmentation de la durée de vie de la batterie: augmentation du nombre de cycles,
- une réduction du poids et du volume embarqués : augmentation de la densité de l'énergie volumique et de puissance,
- une réduction du coût de fabrication.

Une feuille de route d'évolution des performances, du prix et des autonomies accessibles en fonction des technologies de batteries avait été réalisée par EDF en 2005. On peut constater sur ce graphique qu'elle prédisait une domination des technologies à base de lithium, prédiction qui semble sur le point de se réaliser dans les délais prévus à l'époque ; on notera par contre que les objectifs de prix annoncés par EDF sont très généreux par rapport à d'autres estimations.



Source : EDF, 2005

La comparaison avec les tableaux précédents montre toute la difficulté d'avoir accès à des informations pertinentes sur les coûts ; une telle incertitude n'a pu être levée compte tenu de l'impossibilité d'obtenir des chiffres précis auprès des entreprises contactées.

### 7.3.3. La batterie lithium-ion représente l'option d'avenir la plus probable pour le véhicule particulier.

Parmi l'ensemble des différentes options technologiques pour le stockage de l'énergie, c'est la technologie lithium-ion qui fait l'objet des espoirs les plus importants. Elle serait capable,

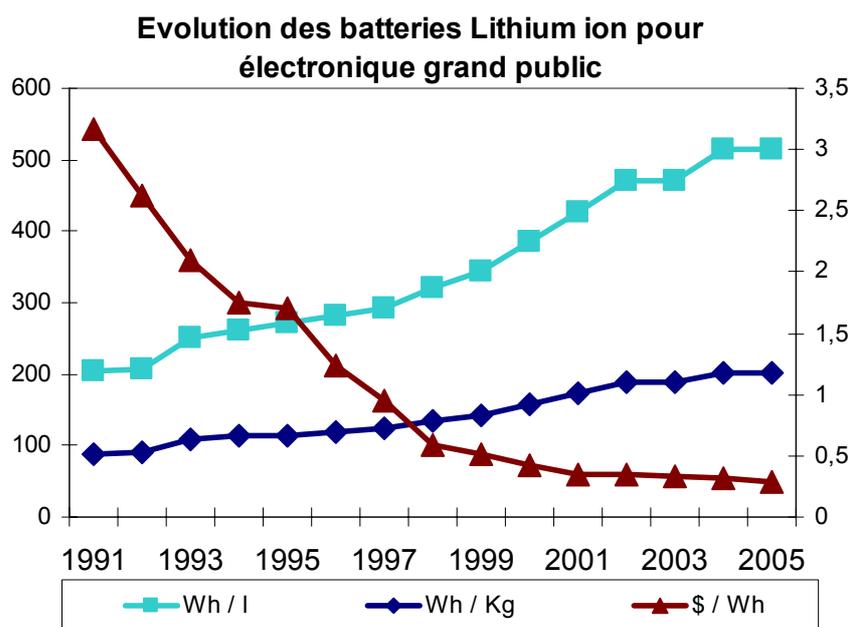
selon la plupart des experts de l'industrie automobile, de permettre à la fois le développement de véhicules hybrides rechargeables et de véhicules purement électriques.

Le tableau ci-dessous donne une idée du nombre de constructeurs ayant décidé d'appliquer la technologie Li-ion pour commercialiser avant 2015 des véhicules hybrides ou électriques. Ce tableau, établi à partir d'informations disponibles en juin 2008 dans la presse, ne prétend pas être exhaustif ; il illustre néanmoins l'intérêt manifesté par l'industrie automobile pour les batteries lithium-ion.

Type de véhicule	Constructeur	Date de commercialisation
Electrique	Mercedes + Smart	2010
	Subaru	2010
	Mitsubishi	2009
	PSA Peugeot Citroën	Date non communiquée
	Renault-Nissan	2010
	Tesla	2008
Hybride (full)	Toyota	2010
	General Motors	2010
	Volkswagen	2010
Hybride (mild)	Mercedes	2009
	BMW	2009

La technologie lithium-ion a déjà été commercialisée en masse pour des petits équipements. Elle équipe aujourd'hui les ordinateurs ou téléphones portables mais elle n'a encore jamais été déployée en masse par l'industrie automobile. Durant les années 1990 et la première moitié des années 2000, cette technologie a fait l'objet d'un rythme de progrès technologique (mesuré par la densité d'énergie massique et volumique des batteries) d'environ 5 % par an, et a réalisé des gains de productivité (mesurés par le taux de décroissance du prix de ces batteries) d'environ 10 % par an.

Le graphe ci-dessous illustre ces évolutions :



Sources: The Freedonia Group Inc., Huret Associates, Inc (cité par Battery University) et Institute of Information Technology, Ltd. Japan

Cette rapide progression a permis aux batteries au lithium de surpasser les batteries Ni-MH au début des années 2000 et le prix des batteries lithium-ion, qui était environ le double de celui des batteries Ni-Mh à la fin des années 1990, était à la mi-2005 quasiment égal<sup>13</sup>.

Ainsi, la technologie des batteries lithium-ion est en cours d'adoption par une majorité de constructeurs automobiles, à la fois pour des véhicules purement électriques et pour des véhicules hybrides. C'est ce qui justifie les investissements de la part des fabricants de batteries, pour développer à la fois des batteries de grande capacité (pour les véhicules électriques et la plupart des types de véhicules hybrides rechargeables) et des batteries de grande puissance (pour les véhicules hybrides). Plusieurs fabricants de batteries (NEC, Sanyo, GS Yuasa entre autres) ont annoncé la production de masse (supérieure à 10 000 unités par an) de batteries au lithium pour véhicules électriques pour le début des années 2010.

#### **7.4. Le véhicule électrique pur nécessite la création préalable d'une infrastructure pour la recharge des batteries**

Le véhicule électrique pâtira encore longtemps d'une autonomie trop réduite. Le panorama des technologies de batteries laisse imaginer des autonomies théoriques jusqu'à 200 km, avec les développements les plus récents, mais aussi les plus coûteux. Le véhicule hybride rechargeable n'a pas ce problème ; c'est pourquoi il apparaît comme une option pertinente pour le véhicule du futur (on pourra se reporter au chapitre 8 pour plus de précisions sur les véhicules hybrides et hybrides rechargeables). Néanmoins, le véhicule hybride rechargeable suppose d'adjoindre à la chaîne de traction électrique une chaîne de traction thermique (hybride parallèle) ou un moteur thermique qui sert de générateur d'électricité (hybride série). Ces ajouts réduisent le volume des batteries nécessaire, mais complexifient le véhicule par rapport à une solution tout électrique, en raison de l'addition de différents composants (moteur thermique, réservoir de carburant, échappement...).

Aussi, différents constructeurs et équipementiers travaillent-ils sur deux pistes qui peuvent rendre possible, en théorie du moins, l'adoption massive de véhicules électriques : *les systèmes de recharge rapide* des batteries d'une part, *les systèmes d'échange rapide* des batteries d'autre part.

Chacun de ces systèmes ajoute une certaine complexité au véhicule, moindre que celle résultant de l'ajout d'un moteur thermique, mais il ne réduit pas le volume des batteries et il entraîne un investissement lourd en infrastructures.

- **Les systèmes de recharge rapide** reposent sur l'utilisation d'une puissance électrique très importante pour recharger la batterie : typiquement de l'ordre de 50 kW, contre 3 kW (valeur moyenne, qui varie d'un pays à l'autre en raison de standards différents) pour un système reposant sur une prise électrique ordinaire. Les systèmes de recharge rapide imposent une seconde prise pour recharger la batterie du véhicule, étant donnée la puissance (> 50 kW) qui devra être transmise. Ainsi, pour un véhicule équipé d'une batterie de 20 kWh (ce qui fournit théoriquement environ 150 km d'autonomie à un véhicule compact), un système de charge rapide permettrait de recharger la batterie en moins d'une demi-heure. Il s'agit donc d'un système qui peut équiper avantageusement certains parkings (centres commerciaux...) et des stations-service, mais qui ne permettra pas de faire rouler des véhicules électriques sur des distances comparables à celles que peuvent parcourir les véhicules thermiques : on ne

---

<sup>13</sup> Source : EPRI, 2006 "technology review and assessment of distributed energy resources"

concevrait en effet pas de devoir s'arrêter 30 minutes tous les 150-200 km pour recharger la batterie.

Notons que ces systèmes de recharge rapides doivent encore faire l'objet d'études poussées car :

- de telles puissances engendrent une surchauffe des batteries, ce qui suppose d'adjoindre au véhicule un système pour les refroidir ;
- ces recharges rapides ont un rendement inférieur aux recharges sur prise classique, ce qui détériore le bilan « du puits à la roue » des véhicules électriques ;
- il faut évaluer d'impact économique de telles recharges, car proposer ces puissances de recharge engendrera un surcoût (infrastructure de charge, conception des véhicules) et réduira la durée de vie des batteries, donc l'intérêt économique du véhicule électrique ;
- ces systèmes seront utiles uniquement s'ils sont présents en grand nombre, ce qui suppose de trouver des acteurs capables de les installer en prévision d'un déploiement de véhicules électriques. Cela ne se produira que si *un standard* est défini et adopté par tous les constructeurs automobiles, à une échelle pertinente (par exemple européenne) ; des initiatives visant à standardiser ces systèmes et à faire émerger des accords entre constructeurs automobiles, équipementiers, énergéticiens et distributeurs d'énergie sont donc nécessaires pour rendre cette option technologique crédible.

• **Les systèmes d'échange de batteries** reposent sur la substitution d'une batterie chargée à une batterie vide. Ils présentent l'intérêt de pouvoir, en théorie, supprimer le problème de la durée de la recharge. Il est en effet possible de concevoir des stations d'échanges de batteries qui permettent de substituer les batteries d'une voiture en quelques minutes au moyen de robots manipulateurs (similaires à ceux utilisés dans les usines d'assemblage). Leur introduction suppose néanmoins *une infrastructure* dont la densité serait comparable à celle des stations-service actuelles, constituée de stations d'échange disposant d'un stock tampon de batteries chargées. Elle suppose également *une standardisation poussée des batteries*, car de tels systèmes perdraient tout intérêt si chaque constructeur automobile équipait ses véhicules de batteries de formes et de connexions incompatibles avec celles de ses concurrents. Enfin, elle suppose évidemment que des constructeurs soient prêts à *intégrer cette contrainte dans la conception* de leurs véhicules et que des acteurs disposant de capitaux importants soient prêts à *investir dans la construction d'un tel réseau* de stations (le coût d'une station d'échange de batterie pourrait se chiffrer en plusieurs millions d'euros).

Une expérimentation à l'échelle de petits pays (Israël, Danemark) devrait avoir lieu dès le début des années 2010 (on pourra se reporter à l'encadré sur le projet « Better Place » en début de ce chapitre). Elle permettra de juger de la pertinence d'un tel système, de son acceptabilité par les automobilistes, de la volonté réelle de constructeurs automobiles, énergéticiens ou autres fournisseurs de services d'imposer cette solution.

## **8. L'hybridation thermique/électrique représente un compromis séduisant ; l'hybride rechargeable sur le réseau constitue sans doute la solution d'avenir**

### **8.1. L'hybridation recouvre une grande variété de techniques**

Techniquement, les motorisations hybrides combinent deux sources d'énergie distinctes pour mouvoir un véhicule. Plusieurs formes d'hybridation peuvent être envisagées en théorie. Elles diffèrent selon la nature, le degré et le niveau de fonctionnalité de cette combinaison ; leur