



# Le Véhicule Zéro Emission

Septembre 2009

valeo added™ 

*Pour un monde automobile meilleur*





Madame, Monsieur,

Si le besoin en déplacement individuel est toujours croissant, les moyens proposés jusqu'ici sont fortement remis en cause par la société. Les émissions des moteurs thermiques sont accusées de contribuer au réchauffement de la planète et à la pollution atmosphérique. De plus, les ressources pétrolières ne sont pas inépuisables. Une alternative au moteur thermique devient indispensable

J'ai le plaisir de vous adresser ce « white paper » qui démontre que le véhicule à propulsion électrique se présente comme l'une des alternatives. Cependant, la route est encore longue et semée d'embûches avant que la voiture électrique devienne un moyen de déplacement de masse.

En effet, l'essor de cette technologie risque de bouleverser l'industrie automobile. Les fabricants de batteries et les fournisseurs d'énergie prendraient une part croissante de l'activité des pétroliers. De nouveaux constructeurs automobiles et équipementiers pourraient émerger, notamment en Asie.

Les constructeurs japonais ont pris une longueur d'avance dans le domaine de la propulsion hybride et électrique ; leurs homologues américains et chinois disposent d'une aide financière conséquente pour rattraper ce retard. Pour que l'industrie automobile européenne conserve sa position, elle doit, elle aussi, pouvoir bénéficier d'un programme d'aides ambitieux, tant sur la recherche et le développement que l'industrialisation.

Enfin, la réussite de la voiture électrique est conditionnée par l'implantation d'une infrastructure de recharge des batteries cohérente. Celle-ci demande un financement conséquent et il conviendra de déterminer une répartition acceptable de cette charge.

Sommes-nous capables de réunir l'ensemble des conditions nécessaires pour qu'à l'avenir – pourquoi pas en 2025 ? – les grands centres urbains n'accueillent plus que des véhicules zéro émission ?

En souhaitant que cette lecture vous permette de mieux appréhender les enjeux de la généralisation du Véhicule Zéro Emissions.

Henri Trintignac  
Directeur Projet Véhicule Electrique

Septembre 2009

---

# LE VEHICULE ZERO EMISSION

<b>1</b>	<b>Historique</b>	<b>4</b>
<b>2</b>	<b>L'automobile actuellement dans une période de transition</b>	<b>5</b>
2.1	Interrogations sur la ressource pétrolière	5
2.2	Pollution globale et réglementations plus sévères	5
2.3	Population de plus en plus urbaine	6
2.4	Les alternatives au pétrole	7
<b>3</b>	<b>Présentation générale des véhicules zéro émission (ZEV)</b>	<b>13</b>
3.1	Le véhicule électrique à batteries	13
3.2	Le véhicule électrique à prolongateur d'autonomie	13
3.3	Le véhicule hybride rechargeable	13
3.4	Autres particularités des véhicules électriques	14
3.5	Avantages et inconvénients des ZEV	15
<b>4</b>	<b>Estimation du marché à court et moyen termes</b>	<b>17</b>
4.1	Les éléments influençant le marché du véhicule ZEV	17
4.2	Estimations du marché	19
<b>5</b>	<b>Les défis technologiques</b>	<b>21</b>
5.1	La première génération (2009-2010)	21
5.2	La seconde génération (2013-2014)	22
<b>6</b>	<b>Une coordination nécessaire entre différents acteurs</b>	<b>25</b>
6.1	L'industrie automobile	25
6.2	Les énergéticiens	25
6.3	Les gestionnaires des infrastructures	26
6.4	Les Etats et les collectivités	27
6.5	Les nouveaux acteurs	28
<b>7</b>	<b>Les offres produits Valeo : des ZEV pour tous</b>	<b>29</b>
7.1	Le consortium pour une filière française	29
7.2	Les innovations dans la chaîne de traction	30
7.3	Le projet VEGA/THOP	31
7.4	Gestion Thermique Moteur des véhicules Hybrides et Electriques	31
7.5	Les solutions de gestion thermique de la batterie	32
7.6	L'éclairage faible consommation	33
<b>8</b>	<b>Les offres véhicules</b>	<b>34</b>
8.1	Les voitures électriques BEV	34
8.2	Les voitures avec prolongateur d'autonomie REBEV	35
8.3	Les voitures hybrides rechargeables PHEV	35
<b>9</b>	<b>Conclusion</b>	<b>36</b>

---

# 1 Historique

Tant que les matériaux connus étaient incapables de résister convenablement à la chaleur de la combustion, il fut impossible de réaliser des moteurs efficaces autres que ceux mus par le vent et les courants d'eau. Après diverses tentatives peu concluantes d'utiliser le vent pour propulser des véhicules automobiles, les concepteurs se reportèrent dès le 18<sup>ème</sup> siècle sur la machine à vapeur dont la technologie commençait à être maîtrisée. Durant près d'un siècle, un certain nombre de véhicules routiers à vapeur aux configurations souvent extravagantes furent construits. Toutefois, en raison de l'encombrement et de la masse élevée tant de la chaudière que des réserves de charbon et d'eau, la machine à vapeur était peu adaptée aux automobiles

En 1828, le principe du moteur électrique fut démontré par Peter Barlow et, en 1839, la chaloupe électrique à roues à aubes de Moritz Hermann Von Jacobi tenta une navigation sur la Neva à Saint-Petersbourg. Le moteur prit feu au bout de quelques minutes et Jacobi en conclut que la propulsion par l'électricité était impossible ! En 1873 à l'Exposition Internationale de Vienne, l'ingénieur français Hippolyte Fontaine exposait deux dynamos. Une erreur de branchement interconnecta les deux machines si bien que lors de la mise en route de la première, la seconde se mit à tourner ! La possibilité de transmettre une puissance électriquement étaient découvertes.

Dès lors, les moteurs électriques concurrencèrent rapidement les moteurs thermiques. Le 16 mai 1881, le premier tramway électrique fut lancé sur la ligne Berlin-Steglitz, en remplacement d'un tram à chevaux. 10 jours plus tard, Gustave Trouvé faisait naviguer sur la Seine un bateau électrique. Cependant, à partir de la voiture à moteur 4 temps Daimler de René Panhard et Émile Levassor en 1889, la vapeur fut supplantée sur les véhicules routiers par les moteurs à combustion interne alimentés au gaz de ville, puis « à l'essence de pétrole ». Dès 1897, des taxis électriques circulaient toutefois à New York alors que, le 29 avril 1899, une automobile électrique en forme d'obus, « La Jamais Contente », de Camille Jenatton, atteignait 105,88 km/h.

Dans cette concurrence entre les voitures « à essence de pétrole » et celles électriques, les premières prirent le dessus en raison de leur autonomie supérieure, de leur puissance et de la facilité à refaire rapidement le plein de carburant. D'autre part, si l'éclairage électrique se généralisait en ville, les prises de courant étaient rares et la tension ainsi que le type de courant n'étaient pas standardisés.

En 1966, le congrès américain préconisa le développement de véhicules électriques pour réduire la pollution atmosphérique dans les villes, mais cette recommandation fut sans suite. Il en alla de même en 1973 après le premier choc pétrolier et l'embargo de l'OPEP envers les Etats-Unis.

Ce n'est qu'en 1988 que General Motors lança un programme de recherche visant à produire en série des voitures électriques. Le premier résultat fut le prototype GM Impact qui, pour répondre à la réglementation ZEV (Zero Emission Vehicle Mandate) de l'état de Californie donna naissance à la fameuse EV1. Les 660 exemplaires produits furent loués à des conducteurs sélectionnés. Puis, entre 1999 et 2002, GM produisit 457 unités d'une seconde génération de l'EV1 dont les batteries Nickel-Metal-Hydrure (NiMH) portaient l'autonomie jusqu'à 240 km. En 2003, GM reprit tous les exemplaires loués pour les détruire, seuls quelques uns ayant été désactivés pour être exposés dans des musées et des universités. Le constructeur fut accusé de céder au lobbying des sociétés pétrolières ; un film de 92 minutes « Who Killed the Electric Car ? », encore disponible en DVD, a été réalisé à ce propos.

Cependant, dès 1998 Honda, Nissan et Toyota commercialisèrent respectivement l'EV Plus, l'Altra et le RAV4 EV. Une expérience de commercialisation récente (1995 – 2005) a eu lieu en France où plus de 10.000 voitures électriques furent mises en service par des entreprises publiques, comme La Poste et EDF, et par l'agglomération de La Rochelle, qui proposait un service de location 24 heures sur 24 en 7 points de l'agglomération. Le parc était constitué de Citroën AX, Saxo et Berlingo, Peugeot 106 et Partner et Renault Kangoo développées en partenariat notamment avec Valeo et Leroy Somer.

Aujourd'hui environ 30.000 véhicules routiers électriques circulent dans le monde, quelques modèles telles que les Tesla, Fiat Fiorino Micro-Vett ou TH!NK city étant disponibles. Cette offre va s'élargir rapidement à partir de la fin de cette année.

Sources : GM, Honda, Nissan, PSA Peugeot Citroën, Renault, Toyota, EDF, [www.veva.ca](http://www.veva.ca), wikipedia.org

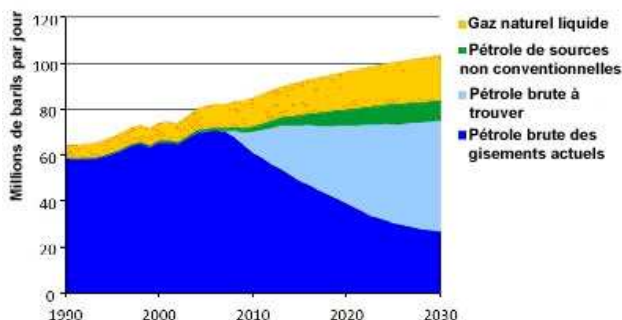
## 2 L'automobile actuellement dans une période de transition

### 2.1 Interrogations sur la ressource pétrolière

Depuis un siècle environ, le développement de notre société est dû en grande partie à la disponibilité de pétrole bon marché. Or le pétrole, dont les gisements se sont constitués il y a des dizaines ou des centaines de millions d'années, est évidemment une ressource épuisable alors que la demande s'accroît fatalement en fonction de la croissance économique, particulièrement celle de la Chine, de l'Inde et du Brésil. Il est aujourd'hui encore très difficile d'évaluer le volume des réserves restantes exploitables ainsi que nos capacités d'extraction à satisfaire la demande à long terme. Les différentes études annoncent un pic de production – estimé selon la méthode de Hubbert – arrivant entre 2005 et 2025. Celle de World Energy Outlook 2008 indique qu'il faudrait trouver 45 millions de barils par jour en plus pour répondre à la demande prévue en 2030. Il va sans dire que, tout au plus dans quelques décennies, nos capacités d'extraction de pétrole seront très largement inférieures à la demande si celle-ci continue de progresser, voire même si elle reste au niveau actuel.

Consommation de pétrole brut en barils/jour

Pays	2001	2007	Var.
Etats-Unis	19 650 000	20 680 000	5%
Europe	14 590 000	14 390 000	-1%
Chine	4 570 000	7 578 000	66%
Japon	5 290 000	5 007 000	-5%
Russie	2 595 000	2 858 000	10%
Inde	2 130 000	2 722 000	28%
Brésil	2 100 000	2 372 000	13%
Autres	24 746 350	29 478 664	19%
Total	75 671 350	85 085 664	12%



En raison de l'épuisement des gisements les plus rentables, le pétrole est extrait de gisements de moins en moins accessibles, par exemple à grande profondeur en mer ou dans les régions polaires. Le coût énergétique et financier de l'extraction augmente car l'utilisation d'équipements toujours plus sophistiqués et consommateurs d'énergie devient nécessaire. Il est évident qu'au point où les équipements de production ont consommé un baril de carburant pour un baril de pétrole extrait, le gisement est devenu non rentable – ceci quel que soit le prix du baril !

### 2.2 Pollution globale et réglementations plus sévères

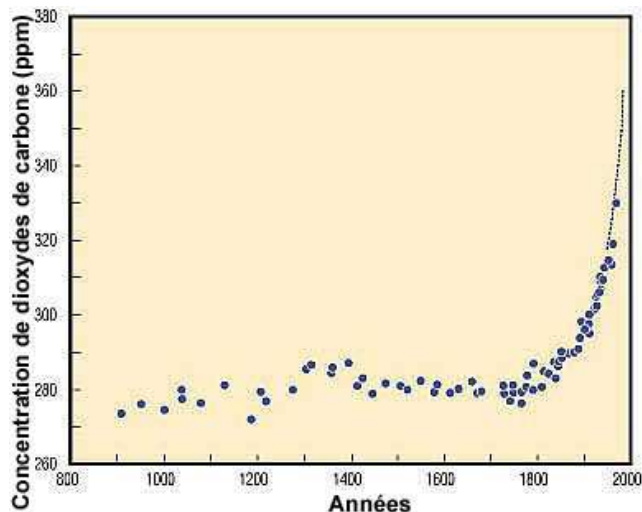
La combustion du carburant d'origine fossile rejette différents polluants : le monoxyde de carbone (CO), les hydrocarbures imbrûlés (HC), les oxydes d'azote (NO<sub>x</sub>), le dioxyde de soufre (SO<sub>2</sub>), les composés organiques volatils (COV) et les suies – aussi nommées particules (PM10 pour celles d'un diamètre aérodynamique inférieur à 10 micromètres). Ces substances nocives se mélangent à l'air, soit par brassage spontané, soit durant la combustion. De nombreuses études ont démontré les liens entre la présence de ces polluants dans l'air et le nombre de décès ou d'hospitalisations pour cause d'affections respiratoires, de mauvaise oxygénation des tissus par le sang, d'aggravation d'insuffisance cardiaque et d'effets cancérigènes.

Bien que les réglementations successives des principaux pays industrialisés aient déjà imposé des réductions drastiques, certains polluants sont toujours émis massivement. Les Etats-Unis, l'Europe et le Japon ont fortement limité les émissions de COV, HC et CO. Les NO<sub>x</sub> et les particules (PM) sont aujourd'hui les cibles prioritaires des législateurs et de nouvelles réglementations sont en cours d'application. Ces nouvelles limites et leurs dates d'application ont été présentées dans notre document « L'automobile face aux défis environnementaux » édité lors du Forum Valeo « La voiture et la ville » en mars 2008.

L'autre conséquence de la combustion de carburant d'origine fossile est l'émission de dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>, gaz carbonique). Le CO<sub>2</sub> n'est pas un polluant atmosphérique, mais sert de régulateur de température à la surface de la Terre en contribuant à l'effet de serre. La présence des

gaz à effet de serre (GES) limite la réflexion de l'énergie solaire vers l'espace. Cet équilibre établit la température en surface de la planète à une moyenne de +14°C alors que sans effet de serre cette température moyenne serait d'environ -18°C.

Un siècle d'industrialisation poussée a introduit une importante quantité supplémentaire de gaz carbonique dans l'atmosphère. En effet, toute combustion d'une matière à base de carbone, comme le pétrole, le gaz naturel ou le charbon, émet du gaz carbonique. L'agriculture, l'industrie, les transports et l'habitat génèrent ainsi 22 milliards de tonnes de CO<sub>2</sub> par an. L'analyse chimique de carottes de glace prélevées en Antarctique a montré que le taux de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère a fluctué au cours de l'ère quaternaire de 180 à 300 ppmv (parties par million en volume). Actuellement, ce niveau est de l'ordre de 380 ppmv et ce chiffre pourrait excéder 560 ppmv en 2050. De 1970 à 2004, l'accroissement est dû au secteur de production d'énergie (+145%), aux transports (+120%), à l'industrie (+65%) et à l'agriculture (+40%). Les conséquences du réchauffement de la planète sont détaillées dans le document Valeo « L'automobile face aux défis environnementaux ».

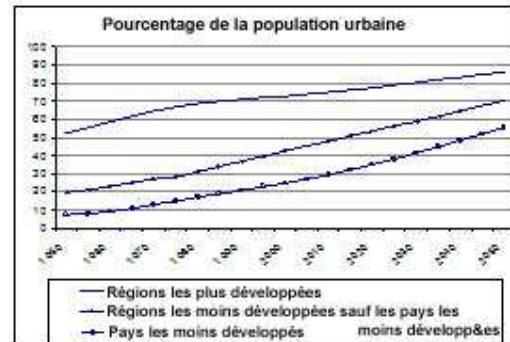
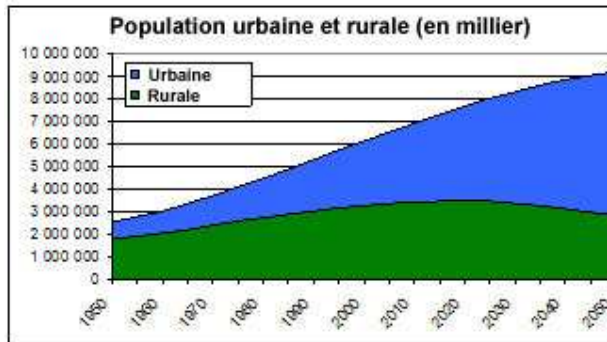


Les émissions de CO<sub>2</sub> sont directement proportionnelles à la combustion de matières carbonées fossiles, charbon et pétrole. Concernant les émissions liées aux transports, les principaux pays développés ont engagé une réglementation visant à réduire ces émissions à moyen terme. L'Europe est la plus volontariste dans ce domaine. Alors que la moyenne des émissions de CO<sub>2</sub> des voitures neuves vendues sur ce marché en 2008 était de 154 g/km sur un cycle NEDC (163 g/km en 2007), une limite de 130 g/km sur 65% des ventes sera imposée à partir de 2012 (100% à partir de 2015). Chaque constructeur se verra attribuer son propre objectif en fonction de sa gamme de véhicules. En 2020, cette limite moyenne passera à 95 g/km.

Les pays les plus industrialisés, réunis lors du dernier G8 de juillet 2009 en Italie, ont convenu de réduire de 80% leurs émissions de GES d'ici 2050 dans le but de plafonner le réchauffement à une hausse égale ou inférieure à 2°C par rapport à la période préindustrielle. Cependant, beaucoup d'experts estiment que la date évoquée est beaucoup trop tardive et qu'il est nécessaire de réduire les émissions de GES plus rapidement pour limiter les risques de catastrophes humanitaires et écologiques.

### 2.3 Population de plus en plus urbaine

La population se concentre de plus en plus dans les zones urbaines. Si 29,1% des humains vivaient en ville en 1950, cette proportion a passé à 48,6% en 2005 et, selon les Nations Unies, elle devrait atteindre 69,6% en 2050. Cette préférence pour les villes concerne toutes les tranches de la population mondiale, mais les régions les plus développées montrent les chiffres les plus élevés avec une proportion qui passera de 52,5% à 86% en un siècle. Les principales raisons de cet exode sont la mécanisation de l'agriculture, la recherche d'un emploi et de plus de confort, les services, les attraits culturels et touristiques des villes – sans parler de la croissance démographique.



Dans les zones urbaines, l'augmentation incessante du nombre d'automobiles est devenue un problème majeur. Elles sont accusées d'engorgement de la circulation, de pollution tant sonore qu'atmosphérique et de constituer un danger pour les piétons et cyclistes. En Europe, le coût des dégradations à l'environnement imputées au trafic routier est estimé à environ 100 milliards d'euros par an, soit 1 % du PIB de l'UE. Dans les pays développés, de plus en plus de municipalités souhaitent réduire, voire interdire, l'accès des voitures dans le cœur des villes. Les tarifs de stationnement exorbitants, les quartiers piétonniers et les péages à l'entrée des grandes agglomérations se multiplient.

Simultanément, les transports en commun sont développés et de nouveaux moyens de transport individuels apparaissent pour essayer d'apporter une réponse aux problématiques de congestion et de pollution. Les services de location de vélos avec possibilité de déposer le cycle dans un autre endroit que celui du départ fleurissent à Paris, Lyon, Bologne, Parme, Berlin, Francfort, Cologne, Munich, Vienne, Bruxelles, Copenhague, Barcelone, Oslo, Londres, Stockholm, etc.. Les ventes de deux-roues motorisés se développent, de même que les moto-taxis. En outre, la possession d'une automobile étant onéreuse et peu pratique en ville, les services d'autopartage permettent à tout moment de disposer d'une voiture à la demande, en libre-service et pour un coût global réduit. Quelques sociétés proposent déjà des locations de voitures électriques dans différentes cités, mais plusieurs d'entre elles, dont Paris, se disent intéressées par un service à plus grande échelle.

Une redéfinition des cités vers un est dans les esprits. Quelques villes tests d'un « urbanisme écologique » existent déjà. À Londres, le quartier de Bedzed (Beddington Zero Energy Development) a été construit pour démontrer qu'il est possible de réduire l'empreinte écologique d'une zone urbaine. Une réduction de 50 % de la consommation énergétique liée aux transports fait partie des objectifs affichés. Dans ce but, les bâtiments sont équipés de panneaux photovoltaïques destinés à recharger des véhicules électriques, mais ce moyen de locomotion n'est pas encore largement utilisé. D'autres écoquartiers sont également en test, par exemple en Chine à Wuhan, en Allemagne à Fribourg-en-Brigau, Hambourg, Hanovre, Stuttgart, Berlin, au Canada à Cartierville, en Suède à Stockholm et Malmö, et aux Pays-Bas dans la Randstad Holland (Amsterdam, Rotterdam, La Haye et Utrecht).

Le projet lancé par Abou Dhabi est d'une envergure plus ambitieuse. Cet Emirat a entrepris la construction d'une cité qui se veut être la première entièrement écologique : Masdar City (« source » en arabe), qui devrait accueillir 50.000 habitants en 2016. L'objectif est un fonctionnement sans émissions de gaz à effet de serre (CO<sub>2</sub> et autres), notamment en ce qui concerne les transports, qui devront être à haute efficacité énergétique. Les moyens privilégiés sont la marche à pied, le vélo et, pour les plus longues distances, un réseau de tramways. L'électricité pour la ville sera générée par une centrale solaire de 100 mégawatts, qui pourra éventuellement être agrandie jusqu'à 500 mégawatts. Pour les déplacements individuels, il est prévu un mode de transport qui doit encore faire ses preuves : le PRT (Personnal Rapid Transit), un tramway de quelques places roulant sur des lignes fixes, mais avec des stations de destination pouvant être sélectionnées individuellement.

## 2.4 Les alternatives au pétrole

Il apparaît ainsi qu'une ou plusieurs alternatives au pétrole soient nécessaires à moyen terme et qu'elles doivent en conséquence être développées dès à présent. La prépondérance du pétrole comme source d'énergie pour les moyens de transport ne sera pas remplacée par une unique autre source, mais par une multitude de solutions selon les besoins, les contraintes et les disponibilités. Le bilan des

émissions de CO<sub>2</sub> présenté ci-après est établi sur les valeurs moyennes d'un véhicule 5 places du segment le plus représentatif en Europe et selon le cycle de consommation européen NEDC. Ce bilan inclut également, en très faible proportion, les autres gaz à effet de serre, le N<sub>2</sub>O et le méthane, convertis en équivalent CO<sub>2</sub> (source : étude conjointe EUCAR, CONCAWE and JRC).

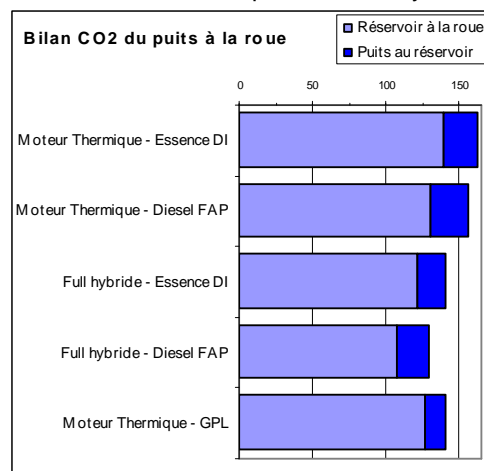
## 2.4.1 Le gaz

### 2.4.1.1 Le GPL

Le GPL (Gaz de Pétrole Liquéfié) est un mélange de propane (C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>) et de butane (C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>) plus lourd que l'air. Il est obtenu soit directement lors de l'extraction du pétrole, soit lors du raffinage. Le GPL est principalement distribué en bouteilles de gaz pour le chauffage domestique, la cuisson des aliments et l'industrie chimique, le transport ne représentant qu'une part minoritaire de sa consommation. Il n'est aujourd'hui consommé en quantités notables pour l'automobile seulement par quelques pays d'Europe et l'Australie, mais la Chine est un marché grandissant, les Etats-Unis peut-être aussi.

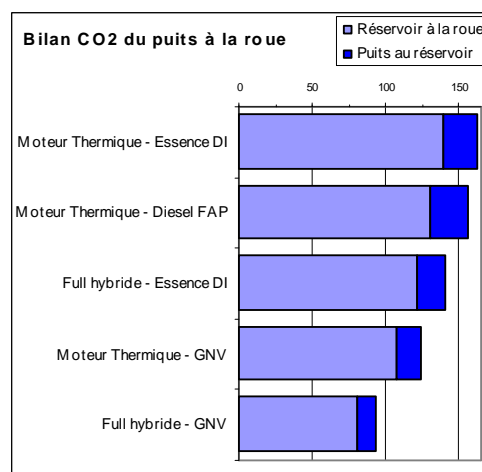
S'il est à l'état gazeux dans les conditions ambiantes, le GPL est généralement stocké à l'état liquide sous une pression de 10 bars à l'état liquide. Il est employé dans les voitures à moteur initialement à essence, soit en mono-carburant, soit en bicarburant GPL/essence. Le ou les réservoirs sont installés à la place de celui d'essence, dans certains volumes libres du soubassement (notamment sur les monospaces et SUV) ou dans le coffre. En raison du haut indice d'octane du GPL, le rapport volumétrique du moteur peut être accru pour bénéficier d'un rendement supérieur. Les systèmes les plus performants injectent le GPL sous forme liquide, mais l'injection directe n'est pour le moment pas réalisable.

L'autre avantage principal du GPL est son utilisation possible sans modifications profondes aux véhicules ni aux infrastructures de production et de distribution existantes. Cependant, le bilan CO<sub>2</sub> du puits à la roue n'est que légèrement inférieur à celui des moteurs à essence (DI : injection directe) et Diesel (FAP : Filtre à Particules) : 141 g/km contre respectivement 163 et 146 g/km à modèle de véhicule identique. De plus, le marché du GPL est limité par les capacités de raffinage qui n'excèdent pas 5 % de celles des autres carburants : on n'en obtient que 20 à 40 kg par tonne de pétrole brut.



### 2.4.1.2 Le GNV/GNL

Les gisements les plus importants de gaz naturel (méthane), dont les réserves sont plus importantes que celles de pétrole, se trouvent dans les pays suivants : Etats-Unis, Russie, Canada, Iran et Qatar, Algérie, Nigéria, Afrique du Sud, Argentine, Australie, etc. Il est acheminé par un important réseau de gazoducs ou, alternativement, à coût élevé à l'état liquide, réfrigéré à -162°C entre des terminaux bien spécifiques par bateaux spéciaux (méthaniers) ; on lui donne alors l'appellation GNL (Gaz Naturel Liquéfié). Pour les applications automobiles, on le nomme GNV (Gaz Naturel Véhicule), mais l'appellation anglophone CNG - Compressed Natural Gas est également courante. Le méthane est stocké à bord sous une pression de 200 bars dans des réservoirs dont le volume correspond à 5 fois celui d'un réservoir d'essence de contenu énergétique équivalent. Un réseau de distribution est en partie déjà existant dans les villes, mais une installation de compression est nécessaire aux postes de ravitaillement car la pression de ce réseau ne dépasse généralement pas 30 bars. L'acceptabilité de la présence des réservoirs de même



que de l'opération spécifique de remplissage sont également des problématiques à considérer.

Le GNV peut être facilement adapté sur un moteur prévu pour fonctionner à l'essence, mais il est préférable d'en augmenter le rapport volumétrique d'environ 30% pour bénéficier d'un meilleur rendement. Le gaz naturel est par ailleurs bien adapté à la suralimentation, de même qu'à un groupe motopropulseur hybride.

Son utilisation dans un moteur thermique adapté améliore nettement le bilan CO<sub>2</sub> car sa molécule (CH<sub>4</sub>) ne contient qu'un seul atome de carbone pour quatre d'hydrogène (CH<sub>4</sub>) et le rendement est supérieur de 10 à 15% à celui d'un moteur à essence. L'amélioration du bilan CO<sub>2</sub> est plus marquante dans un véhicule full hybride (voir tableau ci-dessus). Notons que la valeur de ce bilan peut être dégradée selon les contraintes de distribution : il se détériore notamment en fonction de la longueur totale du gazoduc, de même que par transport maritime.

#### 2.4.1.3 Le biogaz

Du gaz, principalement du méthane, peut être obtenu à partir de la fermentation de matières organiques (BTL – Biomass-to-Liquid). Ces matières peuvent être du fumier, des résidus de récolte ou des déchets ménagers. Il est également possible de produire du biogaz à partir de cultures, mais le coût global de l'opération est très élevé.

Le bilan de GES varie selon les procédés – la problématique étant les fuites de méthane pendant la transformation – mais il est particulièrement intéressant : entre 32 g/km et 143 g/km. Cependant, cette production ne peut que contribuer à une fraction infime du volume de gaz débité par le réseau de distribution existant.

### 2.4.2 **Les carburants liquides alternatifs**

Les carburants liquides alternatifs ont l'avantage de pouvoir être distribués avec les infrastructures déjà en place pour l'essence et le gasoil ; ils peuvent généralement y être mélangés en différentes proportions et les véhicules actuels peuvent être adaptés sans modifications profondes.

#### 2.4.2.1 Les agrocarburants

L'éthanol est produit par la fermentation de sucres principalement issus de la canne à sucre, du maïs, du blé et de la betterave sucrière. Le bio-gazole, ou Diester, est obtenu à partir du colza ou du tournesol. Les émissions de CO<sub>2</sub> dues à l'utilisation des agrocarburants dépendent d'un grand nombre de facteurs extrêmement variables, notamment des procédés de transformation et de l'impact spécifique de la culture intensive. Ce dernier point est l'un des plus difficiles à quantifier. D'une part, l'épandage d'engrais azotés est la principale source d'émissions de protoxyde d'azote (N<sub>2</sub>O) dont le potentiel de réchauffement global est 300 fois plus élevé que celui du CO<sub>2</sub>. D'autre part, une étude de R. Righelato et D. Spracklen publiée par la revue « Science » en août 2007 confirme que le bilan est particulièrement catastrophique lorsque la forêt primaire est rasée pour faire place à des monocultures, ce qui dégage entre 100 et 200 t de carbone à l'hectare. Il faudrait 50 à 100 ans de consommation d'agrocarburant obtenu de ces cultures en remplacement du carburant fossile pour compenser cette émission initiale. Ces chercheurs ont aussi calculé que la reforestation séquestre 2 à 9 fois plus de carbone en 30 ans que ce qu'on éviterait d'émettre grâce au biocarburant produit sur la même surface.

De nouveaux développements qui fourniront un biocarburant de seconde génération devraient aboutir à une production à partir de déchets organiques comme la paille de blé ou la pulpe de betterave sucrière. Il subsiste cependant encore beaucoup d'incertitudes quant au coût et à la capacité de production en quantités industrielles. Les études montrent que selon les procédés employés et la matière de base, il serait possible d'atteindre un bilan du puits au réservoir variant de + 40 à - 117 g/km (le chiffre négatif indique une absorption du CO<sub>2</sub>). Sur la base d'une valeur du réservoir à la roue de 136 g/km, le bilan global des émissions de CO<sub>2</sub> serait ainsi compris entre 176 et 19 g/km seulement selon les procédés utilisés.

#### 2.4.2.2 Les carburants synthétiques

Du gazole synthétique peut être produit par le procédé Fischer-Tropsch (FT). Plusieurs principes sont en cours de développement plus ou moins avancé :

- Le GTL (Gas-to-Liquid) est produit à partir du gaz naturel. Utilisé en mélange avec du gazole ou pur, il n'apporte aucun gain en émissions de CO<sub>2</sub> du puits à la roue.
- Le CTL (Coal-to-Liquid) obtenu par la gazéification préalable du charbon n'est admissible que si sa production est combinée avec un système de captage et de stockage du CO<sub>2</sub> ; sinon les émissions « du puits à la roue » sont approximativement 2,3 fois plus élevées qu'avec les carburants issus du pétrole.

### 2.4.3 L'hydrogène (H<sub>2</sub>)

L'alternative au stockage électrique d'énergie consiste à passer par le vecteur hydrogène (H<sub>2</sub>). Le fait que l'hydrogène n'a pas d'atome de carbone dans sa molécule implique que sa combustion n'émet localement ni CO<sub>2</sub>, ni hydrocarbures imbrûlés (HC) ni monoxyde de carbone (CO). Mais il n'existe quasiment pas d'hydrogène naturel sous forme combustible sur cette planète. Une loi fondamentale de la thermodynamique stipule que l'extraction des deux atomes d'hydrogène de la molécule d'eau consomme beaucoup plus d'énergie que celle produite par la combustion de cet hydrogène. Le reformage du méthane (CH<sub>4</sub>) est donc utilisé pour 97% de l'insignifiante production actuelle d'hydrogène. Ce procédé consomme proportionnellement plus de gaz que lorsqu'il est brûlé directement et la perte de rendement inhérente au processus double pour le moins les émissions de CO<sub>2</sub> par rapport à l'usage direct du méthane.

L'H<sub>2</sub> est un gaz environ 8 fois plus léger que le méthane et qui doit donc être comprimé à très haute pression ou liquéfié pour être stocké en quantités significatives : sous 700 bars, 1 kg d'H<sub>2</sub> occupe encore un volume de 23 litres. Sa liquéfaction pour stockage cryogénique à - 253 °C consomme au minimum 30% du contenu énergétique initial de l'hydrogène, mais elle permet d'en concentrer 1 kg dans un volume de 14 litres.

La distribution d'hydrogène pose également problème : pour des raisons de coût et de sécurité, il est inconcevable de relier toutes les stations-service par des gazoducs. Le transport par camions est possible, mais, du fait de la faible densité énergétique de l'hydrogène, il faudrait au moins 19 camions spéciaux pour transporter l'équivalent énergétique d'un simple camion-citerne d'essence. D'autre part, le remplissage des réservoirs pose un problème de sécurité.

L'hydrogène peut être employé soit dans un moteur thermique, soit dans une pile à combustible.

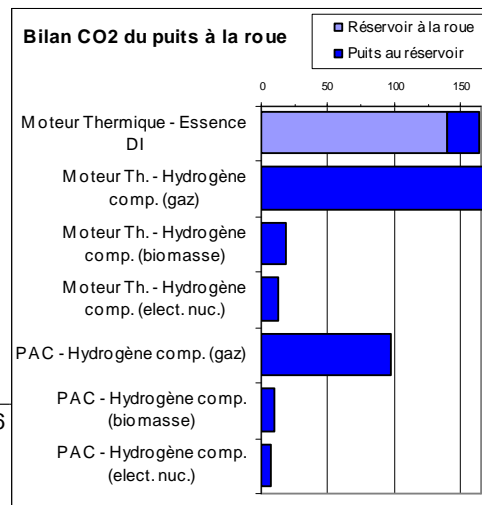
#### 2.4.3.1 Le moteur thermique à hydrogène

Un certain nombre de prototypes sont en cours de test. S'ils confirment l'absence d'émission de CO<sub>2</sub> au niveau local (il y a en fait une émission de quelques grammes en raison de la combustion d'huile de lubrification), ce concept bute sur de grandes difficultés. Le moteur ne développe qu'une puissance spécifique réduite par rapport à la version essence, principalement en raison du fort besoin en air de combustion de l'hydrogène et du grand volume qu'il occupe injecté à l'état gazeux. La température de combustion élevée (théoriquement jusqu'à 3000°C) produit des NO<sub>x</sub> qui sont également un gaz à effet de serre (ces véhicules ne sont pas classés ZEV – Zero Emission Vehicle) et il est difficile de maîtriser la combustion car la propagation du front de flamme est extrêmement rapide.

Le bilan CO<sub>2</sub> est principalement dépendant de la méthode de production d'hydrogène : électrolyse alimentée par centrale nucléaire ou par une source d'énergie renouvelable – solution la moins émettrice. En cas de reformage comme c'est le cas actuellement, ce procédé résulte en 5 à 10% d'émissions de CO<sub>2</sub> supplémentaires « du puits à la roue » par rapport à l'essence. Par ailleurs, le stockage sous forme liquide engendre encore plus d'émissions de CO<sub>2</sub> que celui sous haute pression.

#### 2.4.3.2 La pile à hydrogène

La pile à hydrogène (PAC – Pile à Combustible) réalise l'opération inverse de l'électrolyse de l'eau : elle combine l'hydrogène et l'oxygène pour produire de l'énergie électrique (et un peu d'énergie thermique qui



peut être récupérée pour chauffer l'habitable) et ne rejette que de l'eau (H<sub>2</sub>O). Ce bon résultat est expliqué par le fait qu'il n'y a pas combustion de l'hydrogène mais réaction chimique. La chaîne de traction nécessite des batteries performantes pour accroître la puissance lors des accélérations et pour assurer la fonction de récupération d'énergie en décélération. Cependant, la pile à combustible demande encore de longs et dispendieux développements en termes de coût, fiabilité, durée de vie et plage de température de fonctionnement.

Son bilan CO<sub>2</sub> suit la même logique que l'utilisation de l'hydrogène dans un moteur thermique, mais avec des résultats nettement plus avantageux.

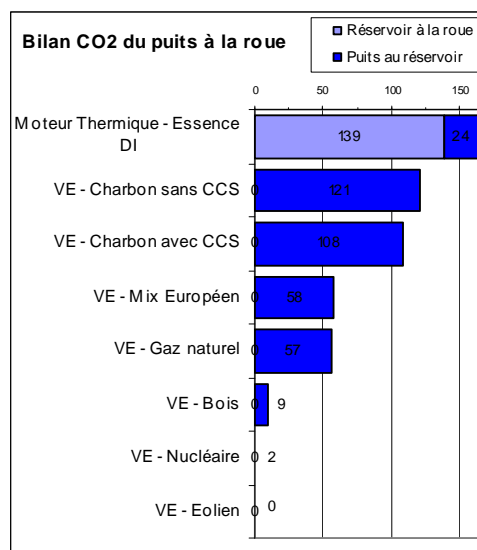
#### 2.4.4 Les véhicules électriques et hybrides rechargeables

Un véhicule routier électrique (VE) est alimenté en énergie par ses batteries. Les variantes dites à « prolongateur d'autonomie » embarquent un moteur thermique accouplé à une génératrice – autrement dit un groupe électrogène – pour recharger leurs batteries. Ce concept est similaire à celui d'« hybride série » rechargeable dont il se distingue difficilement, si ce n'est par la capacité de stockage des batteries (ces trois types de véhicules sont présentés plus en détail dans le chapitre suivant). Un véhicule électrique n'émet évidemment ni CO<sub>2</sub>, ni gaz polluants au niveau local ; par contre, les émissions dues à la production d'électricité entrent en compte dans le bilan « du puits à la roue ». Ce bilan global dépend donc de la façon dont est générée l'électricité, avec des variations considérables d'un procédé à l'autre.

L'électricité peut être produite dans une centrale thermique au fioul, au gaz ou au charbon. Les centrales au charbon, grandes émettrices de CO<sub>2</sub>, sont encore nombreuses, notamment en Chine. L'utilisation d'un véhicule électrique qui aurait chargé ses batteries de ce type de centrale donne un bilan CO<sub>2</sub> assez mauvais : 121 g/km. Des recherches de captage et de séquestration du CO<sub>2</sub> (CCS – Carbon Capture and Storage) sont en cours mais certaines estimations ne donnent qu'une baisse de 13 g/km. Les émissions de CO<sub>2</sub> des centrales à gaz sont environ la moitié de celles au charbon, en raison de leur meilleur rendement et du fait déjà cité que la molécule de méthane ne contient qu'un atome de carbone pour 4 d'hydrogène. Quelques centrales au biogaz issu de la fermentation de matières organique (biomasse) sont opérationnelles, mais leur apport est insignifiant. Une centrale thermique pourrait générer de l'électricité par la combustion de matière organique renouvelable (plantes, arbres et déchets animaux, agricoles ou urbains), mais le pouvoir énergétique de ces déchets est beaucoup plus faible que celui des combustibles fossiles. Le bilan est cependant très avantageux, étant évalué à 9 g/km seulement.

Les sources d'énergie renouvelables sont particulièrement intéressantes pour la production d'électricité car elles n'émettent pas de CO<sub>2</sub> après leur mise en place. La plus anciennement utilisée et la plus répandue est l'énergie hydraulique, qui dépend du cycle de l'eau. Les autres, en plein développement, sont l'éolien, le solaire (cellules photovoltaïques) et la géothermie (récupération de la chaleur de la Terre). Si leur bilan CO<sub>2</sub> est des plus positifs, l'inconstance de leur production pose souvent problème en raison de conditions aléatoires (vent, ensoleillement). Par ailleurs, étant donné qu'il est impossible pour le moment de stocker l'énergie sous forme électrique (toute production doit être aussitôt consommée), leur production doit être intégrée dans un réseau important et capable de moduler la quantité d'énergie en fonction de la demande immédiate.

Pour faire tourner ses turbines à vapeur, une centrale nucléaire exploite la chaleur dégagée par la fission d'atomes d'un combustible fissile non-renouvelable : l'uranium, dont le minerai radioactif est contenu dans le sous-sol de la planète. La première centrale nucléaire commerciale, d'une capacité initiale de 50 MW a démarré en 1956 à Sellafield en Angleterre. Ces centrales peuvent produire une puissance électrique considérable, sont capables de s'adapter aux fluctuations de la demande à raison de 5% par



minute entre 30% et 100% de leur puissance maximale et elles sont indépendantes des ressources pétrolières. Les émissions de CO<sub>2</sub> de notre véhicule type alimenté à l'électricité d'origine nucléaire sont évaluées à 2 g/km, imputables principalement à la gestion de l'uranium (extraction, transport, etc.).

<b>Consommation électrique non-fossile en 2006</b>						
<b>(Milliard de kWh)</b>						
	Hydro-électrique	Nucléaire	Autres renouvelables	Total	Consommation totale	% non-fossile
Amérique du Nord	671,18	890,61	130,18	1 691,97	4 543,66	37%
Amériques Centrale et du Sud	639,61	20,91	25,20	685,72	801,67	86%
Europe	532,00	958,05	183,53	1 673,58	3 296,57	51%
Eurasie	243,53	240,19	3,33	487,05	1 196,44	41%
Moyen Orient	23,23	0	0,13	23,36	558,40	4%
Afrique	90,92	10,07	2,31	103,31	480,00	22%
Asie et Océanie	796,58	540,43	69,63	1 406,64	5 501,88	26%
<b>Total mondial</b>	<b>2 997,06</b>	<b>2 660,26</b>	<b>414,31</b>	<b>6 071,63</b>	<b>16 378,62</b>	<b>37%</b>

Les émissions de CO<sub>2</sub> d'un véhicule électrique sont donc principalement dépendantes du pourcentage d'électricité produite par les divers moyens de génération. En 2006, 37% de l'électricité consommée mondialement provenait de sources renouvelables ou nucléaires. Les Amériques Centrale et du Sud montrent un chiffre très favorable en raison du grand nombre de centrales hydroélectriques. Les pays développés, qui doivent également répondre à l'accroissement de la demande, comptent sur le déploiement de centrales nucléaires supplémentaires et/ou des énergies renouvelables : géothermie, solaire, éolien, biomasse et déchets.

Une voiture électrique à « prolongateur d'autonomie » émet du CO<sub>2</sub> uniquement lorsque son moteur thermique tourne pour recharger ses batteries. Une voiture hybride rechargeable émet également du CO<sub>2</sub> lorsque son moteur thermique est utilisé lors de la recharge de la batterie et/ou pour l'entraînement des roues. Le bilan global de ces deux types de véhicules reste largement favorable comparé aux véhicules thermiques conventionnels.

Sources :

- BMW
- CIA World Factbook
- EUCAR, CONCAWE et JRC (the Joint Research Centre of the EU Commission)
- Energy Information Administration – EIA (Section of the US Department of Energy)
- IFP (Institut Française du Pétrole)
- Intergovernmental panel on climate change
- NASA
- NationMaster
- Nations Unies
- Renault

### **3 Présentation générale des véhicules zéro émission (ZEV)**

Un véhicule est classé ZEV s'il n'émet aucune émission nocive ni CO<sub>2</sub> au niveau local. Si des véhicules à pile à combustible pourront éventuellement être commercialisés dans un futur éloigné, le stockage d'énergie électrique est la seule technologie aujourd'hui disponible en production de série qui soit capable de propulser un véhicule routier sans émissions.

#### **3.1 Le véhicule électrique à batteries**

Comme mentionné sous 2.4.4, un véhicule électrique à batteries (BEV – Battery Electrical Vehicle) est propulsé exclusivement par un ou plusieurs moteur(s) électrique(s) alimentés par l'électricité stockée dans des batteries. Un système de contrôle électronique gère à la fois la puissance selon la demande du conducteur et la récupération de l'énergie cinétique lors des décélérations. La transmission peut consister uniquement en un réducteur – plus éventuellement un différentiel – la marche arrière, le démarrage, l'accélération et la décélération récupératrice étant directement assurés en continu et sans à-coups par le ou les moteurs(s). Déjà employées sur les petits appareils électroniques comme les téléphones portables, les batteries au lithium-ion procurent une capacité de stockage massique 4 fois supérieure à celle de batteries au plomb. Le véhicule peut être rechargé en le branchant sur le secteur par une simple prise 110/220 volts (charge lente) ou par l'intermédiaire d'une installation supplémentaire triphasée 32 ampères (charge semi-rapide). Ce dernier type de connexion devrait également devenir disponible dans des villes et sur des parkings.

L'autonomie des BEV dépend directement de la capacité des batteries et de la consommation pour sa propulsion et le maintien de son confort thermique. Les modèles de première génération, prévus pour 2011, offriront une autonomie comprise entre 100 et 250 km, valeur variant selon les conceptions, la configuration du trajet, la vitesse et le style de conduite. Cette limite n'est pas technique car il suffit d'embarquer une quantité suffisante de batteries, mais économique. Cette caractéristique, ainsi que l'ensemble des avantages cités précédemment, font que les véhicules électriques sont bien adaptés à une utilisation urbaine et périurbaine.

#### **3.2 Le véhicule électrique à prolongateur d'autonomie**

En variante dite à « prolongateur d'autonomie » (REBEV – Range Extender Battery Electrical Vehicle), la propulsion est toujours exclusivement assurée électriquement, mais ces véhicules embarquent un groupe électrogène et un réservoir de carburant plutôt qu'un maximum de batteries. Ils disposent toutefois d'assez de batteries pour assurer une autonomie suffisante en mode électrique dans la plupart des conditions d'utilisation courante. En effet, selon différentes études, plus de 80% des trajets journaliers ne font au maximum que 50 à 60 kilomètres.

Le moteur thermique n'est employé que lors d'une utilisation sur une plus grande distance. La totalité de sa puissance mécanique est exclusivement dédiée à l'entraînement de la génératrice électrique, le courant produit étant réparti entre le ou les moteur(s) électrique(s) et la recharge des batteries, en fonction des besoins momentanés. Dans ce cas, la voiture fonctionne comme une hybride en montage série.

La puissance du moteur thermique est généralement inférieure à celle du ou des moteur(s) électrique(s) car celui-ci ou ceux-ci peuvent être alimentés simultanément par du courant provenant des batteries. L'autonomie dépend principalement de la capacité du réservoir de carburant. Par exemple, GM annonce pour la Chevrolet Volt une autonomie de 60 km en mode électrique alors qu'elle dépasse 500 km au total.

#### **3.3 Le véhicule hybride rechargeable**

Un véhicule hybride rechargeable (PHEV – Plug-in Hybrid Vehicle) est doté de deux systèmes de propulsion : un thermique et un électrique, qui peuvent être combinés de différentes façons (en parallèle, en série, en division de puissance ou autre). Ce véhicule peut ainsi rouler soit grâce à ces deux systèmes travaillant conjointement, soit grâce à l'un des deux. L'énergie électrique est stockée dans des batteries qui peuvent être rechargés soit à l'arrêt sur le secteur, soit en prélevant une partie

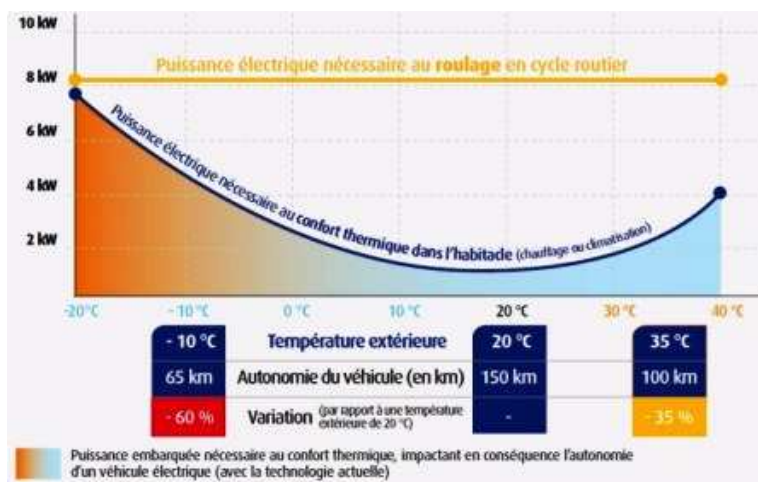
ou la totalité de la puissance du moteur thermique. Dans des conditions de trafic urbaines et périurbaines, ce type de véhicule peut accomplir plusieurs dizaines de kilomètres en mode électrique. En fait, le dimensionnement des batteries est généralement réduit par rapport aux voitures électriques à prolongateur d'autonomie – ceci afin de limiter le surcoût car ce type de véhicule comprend un GMP thermique de plus forte puissance. Par ailleurs, en raison de la capacité de traction entièrement électrique, en principe plus forte et exploitable sur des distances supérieures que pour la majorité des véhicules hybrides non rechargeables, le moteur électrique et son électronique de commande doivent être à même de supporter des contraintes plus élevées. Cela impose un dimensionnement conséquent de l'architecture électrique de façon à assurer un fonctionnement continu et un meilleur rendement.

Comme pour le type à prolongateur d'autonomie, l'autonomie totale de ce type de véhicule est principalement dépendante de la capacité du réservoir.

### 3.4 Autres particularités des véhicules électriques

Plusieurs projets de voiture électrique partent d'une plateforme initialement prévue pour une propulsion thermique. Le remplacement du moteur thermique et de sa transmission par un ensemble comprenant moteur électrique, onduleur, chargeur, convertisseur de tension et réducteur ne pose pas de difficultés sérieuses en ce qui concerne l'encombrement car le volume de ces équipements est maîtrisé. Le problème majeur est l'installation des batteries car, à capacité de stockage d'énergie égale, des batteries lithium-ion nécessitent respectivement un volume et une masse en moyenne 14 fois et 19 fois plus importants qu'un réservoir de carburant. Sans modification notable de la caisse, les seuls emplacements disponibles sont le tunnel, l'espace sous les sièges, le logement de la roue de secours, le coffre et le compartiment moteur. Le pack de batteries incluant ses protections mécaniques, thermiques et électroniques pouvant dépasser 200 kg, il s'agit de l'agencer de façon à obtenir une répartition des masses correcte et un centre gravité aussi bas que possible. En outre, le supplément de poids peut imposer des renforcements sur la coque, les trains roulants et la direction. Le positionnement idéal des batteries est au centre du châssis et au plus bas. À défaut d'une plateforme développée dès le départ pour ce mode de propulsion, des modifications majeures peuvent être nécessaires.

Un véhicule électrique ne pouvant récupérer une partie de la chaleur évacuée en perte par le moteur thermique, il est nécessaire de reconsidérer les fonctions de chauffage et de climatisation de l'habitacle afin de limiter la quantité d'énergie prélevée sur la batterie. En effet, dans des conditions hivernales extrêmes, l'énergie consommée par le chauffage devient équivalente à celle nécessaire à la chaîne de traction alors que par haute température ambiante la climatisation peut absorber jusqu'à la moitié de cette puissance.



Source : Valeo

## 3.5 Avantages et inconvénients des ZEV

### 3.5.1 Points forts

#### Absence d'émissions

L'absence d'émissions des ZEV est particulièrement appréciée en zone urbaine où une grande densité de véhicules à moteurs thermiques accroît considérablement la pollution de l'air. Selon l'étude PEACE, la concentration moyenne de PM10 (particules d'un diamètre aérodynamique inférieur à 10 micromètres) dans certaines villes d'Europe dépasse parfois la limite fixée par l'Organisation Mondiale pour la Santé (OMS) de 40 microgrammes/m<sup>3</sup>. Le record semble détenu par Athènes avec une valeur mesurée à 99 microgrammes/m<sup>3</sup>. Dans les zones rurales, à quelques dizaines de kilomètres des grandes agglomérations urbaines, ces valeurs sont en moyenne inférieures de 22%.

#### Silence de fonctionnement

Le bruit a également des effets nocifs sur la santé humaine : stress, troubles du sommeil, effets sur le système cardio-vasculaire, immunitaire et endocrinien, voire conséquences sur la santé mentale. À cet égard, les véhicules à propulsion électrique sont si silencieux qu'un bruiteur est prévu pour avertir les piétons, culturellement habitués aux voitures bruyantes. On ne le réalise réellement que lorsque l'on rencontre en marchant une voiture hybride en mode tout-électrique.

#### Agrément de conduite

La voiture électrique se caractérise également par sa facilité et son agrément de conduite : pas de rapports de boîte de vitesses à passer, pas d'embrayage, pas de risque de calage du moteur, pas de vibrations et quasi absence de bruits mécaniques dans l'habitacle. Le moteur électrique offre un pouvoir de traction ininterrompu, sans à-coups. Ces caractéristiques invitent à une conduite calme et déstressée. La voiture électrique est également capable de procurer une conduite dynamique car son moteur électrique fournit son couple maximal à partir de l'arrêt (0 tr/min) alors que le couple maximal n'est atteint qu'à 1400 tr/min au moins pour les moteurs Diesel d'automobile les plus récents et beaucoup plus haut pour les moteurs à essence – entre 2500 tr/min et... 16.000 tr/min (F1) selon le type. Il en résulte qu'un véhicule électrique offre des accélérations étonnantes à basse vitesse. À titre d'exemple, une Bolloré Bluecar propulsée par un moteur électrique de 50 kW accélère de 0 à 100 km/h en 10 secondes alors qu'il faut un moteur thermique d'une puissance nominale d'au moins 85 kW pour accélérer ainsi une voiture de poids identique.

### 3.5.2 Points faibles

#### Autonomie

En raison de la basse densité énergétique des batteries, l'autonomie d'un véhicule électrique (BEV) est largement inférieure à celle d'un véhicule à essence (ou a fortiori diesel) comparable. Les développements actuels annoncent des autonomies variant de 80 à 250 km. L'utilisation doit donc se limiter à de courts parcours, ce qui correspond à une majorité de cas (80 à 87% des trajets journaliers ne font au maximum que 50 à 60 kilomètres). Deux palliatifs sont possibles. Le premier est l'installation de bornes de recharge rapides qui permettent une charge de 80% en 30 minutes. Le second est un service de changement automatique des batteries réalisé en quelques minutes. Le concept consiste à utiliser des robots pour le remplacement des 150 à 250 kg de batteries, la gestion de la station étant réservée à du personnel qualifié. Ce système sera mis en place en Israël en 2011. Face à ce point faible, les véhicules à prolongateur d'autonomie et hybrides rechargeables présentent un compromis entre les véhicules thermiques et les tout-électriques.

#### Réseau de charge à créer

Le modèle de la borne en charge lente installée chez le particulier ne pose pas de difficultés, hormis la question de disponibilité d'un garage. La problématique de ces installations dans les lieux publics est tout autre. Il conviendra d'assurer une couverture suffisante de la zone afin de satisfaire les besoins des utilisateurs, voire de rassurer les futurs acheteurs. La détermination des emplacements ainsi que les pourcentages respectifs des bornes lentes et rapides seront à définir. Nettement plus onéreuses, les secondes seront probablement en moindre nombre. L'autre problème inhérent aux villes est le manque de surface, il suffit par exemple de voir la difficulté de l'implantation des systèmes de vélo en location qui n'a pu se faire que par la conversion partielle de trottoirs et la suppression de places de stationnement.

### Coût de l'infrastructure

Le maillage d'une zone urbaine, voire également périurbaine, peut atteindre des sommes très élevées. C'est probablement le point le plus problématique, celui qui conditionnera le succès ou l'échec de la voiture électrique. Le coût d'une borne de charge lente est estimé entre 1000 et 2000 \$, celui d'une borne de charge rapide est 15 à 20 fois plus élevé. Qui assurera ce financement : les utilisateurs, la collectivité, sous forme de taxes ou de subventions, ou les « pollueurs » ? Pour ces derniers, il est à noter que la voiture électrique ne répond pas à tous les besoins d'utilisation et que le moteur thermique sera encore nécessaire quelque temps. Des sociétés pourraient également participer si cette activité leur permettra de mieux réguler leurs quotas d'émissions de CO<sub>2</sub>. L'alternative, le service de changement automatique des batteries, pose également un problème économique. En effet, ce système accroît considérablement le coût de fonctionnement de l'infrastructure en raison de la nécessité de disposer d'un nombre élevé de batteries en stock pour la recharge.

### Coût des batteries

Un autre obstacle au déploiement à grande échelle de voitures électriques est le coût élevé des batteries lithium-ion, actuellement d'environ 500 € par kWh. Il s'agit d'un sujet de développement prioritaire chez les spécialistes car une voiture qui devrait embarquer 20 kWh nécessiterait une batterie à 10.000 €, soit vraisemblablement près de la moitié du coût de la voiture ! Il est probable que le prix de ces batteries descende vers les 300 € kWh à moyen terme, voire en dessous. Les fournisseurs de batteries devront également prendre en charge le recyclage de leur produit. En contrepartie, ils pourront récupérer une partie du lithium et le recycler dans la chaîne de production. Il y a aussi un intérêt à réduire la consommation électrique afin de diminuer la quantité d'énergie à embarquer. Cette consommation est actuellement à environ 0,2 kWh par kilomètre, répartie entre l'énergie pour propulser la voiture, l'éclairage, le chauffage ou la climatisation. Un abaissement de la consommation à 150 Wh/km grâce à de nouveaux développements réduirait le coût des batteries de 25%. Une autre solution est de réduire la capacité des batteries embarquées, mais cela ne peut évidemment se faire qu'aux dépens de l'autonomie.

Pour l'utilisateur, le prix d'achat élevé du véhicule, lié à celui des batteries, sera atténué par son coût kilométrique particulièrement avantageux par rapport à un véhicule à moteur thermique. La première raison est le bas prix de vente du kWh, mais il est vrai que dans une majorité de pays l'électricité n'est pas surtaxée comme le sont les carburants fossiles. La seconde raison est l'excellent rendement d'une chaîne de traction électrique : 65 à 80% contre environ 15% en propulsion thermique sur un cycle NEDC. Une troisième raison est la récupération d'une bonne partie de l'énergie cinétique lors des freinages et décélérations.

Il est probable qu'une formule de location du véhicule, voire des batteries uniquement, soit l'offre la plus abordable pour les acquéreurs. Exemples de tarifs mensuels de location, la Bolloré Bluecar sera proposée en France à 330 € et la Mini E en Allemagne à 650 €.

#### Sources :

- Bolloré
- BMW
- General Motors
- Renault
- Valeo

## 4 Estimation du marché à court et moyen termes

### 4.1 Les éléments influençant le marché du véhicule ZEV

L'estimation du marché des ZEV pour les années à venir est un exercice hautement périlleux tant le nombre d'impondérables, mais aussi de paramètres à prendre en compte, est important. Une telle étude est malgré tout indispensable pour anticiper au mieux le modèle de développement de ce nouveau type de véhicules. Il est donc de la plus haute importance de tenter d'appréhender tous ces paramètres tout en restant conscients des risques potentiels inhérents à une estimation du marché futur.

#### 4.1.1 Les coûts

Comme déjà mentionné sous 3.5.2, le coût est l'une des problématiques de la voiture électrique, principalement en raison du prix des batteries à base de lithium-ion. En zone urbaine, la voiture électrique sera en concurrence avec la voiture thermique. Or, s'il est prévu que le prix des batteries aille en décroissant, le cours du baril de pétrole est plutôt en forte hausse malgré des fluctuations considérables. Il était en effet à 30 \$ en 2003 avant de monter à 70 \$ en 2006 puis de toucher un sommet à 140 \$ en été 2008. Certains analystes, à la suite d'Arjun N. Murti de Goldman Sachs, prévoient alors que le baril atteindrait les 200 \$ vers la fin 2008, mais la baisse d'activité industrielle et économique consécutive a engendré une réduction de la demande globale d'énergie, si bien que le cours du brut est redescendu à 40 \$ / baril début 2009 avant de remonter autour des 70 \$. Une forte incertitude demeure sur le prix du baril à court terme, mais la tendance à long terme sera vraisemblablement à la hausse malgré des fluctuations imprévisibles mais probablement toujours fortes en raison du phénomène de résonance engendré par une offre plafonnée et une demande qui varie en fonction de la conjoncture, elle-même dépendante du cours du brut. La date du croisement définitif des deux courbes, au moment où la hausse du baril rendra le prix des batteries avantageux, sera un élément déterminant pour le marché des ZEV.

Toutefois, une hausse forte et durable du cours du pétrole tendra subséquemment, par un effet de vases communicants, à augmenter le prix de toutes les autres sources d'énergie.

Quoi qu'il en soit, l'achat de voitures dites « non-polluantes » reçoit déjà une aide financière de l'Etat dans plusieurs pays, ceci afin d'inciter le contribuable à participer à la réduction de la pollution de l'air et des émissions de CO<sub>2</sub>. Par exemple, le gouvernement britannique a annoncé une subvention allant jusqu'à 5.800 € (£ 5.000) à l'achat d'une voiture électrique. Du fait de leur classement ZEV, les voitures électriques devraient continuer à bénéficier de subventions dans les années à venir. Ainsi, si le surcoût d'une voiture électrique par rapport à une voiture à essence comparable est estimé entre 12.000 et 15.000 € et que le coût de l'exploitation permet un gain de 8.000 à 9.000 €, l'aide à l'achat devrait être de 5.000 €. Cette incitation est d'autant plus justifiée que leur tarif élevé risque d'être un frein majeur à leur diffusion. Comme les Etats tirent une partie de leur revenu des taxes sur les carburants, il est vraisemblable qu'ils ne pourront pas à la fois perdre une part de ces revenus et financer l'achat de voitures électriques. Les gouvernements ont donc intérêt à fournir des aides publiques dès maintenant pour la recherche et le développement de la voiture ZEV afin de limiter le budget total alloué à la prime à l'achat, budget qui pourrait s'envoler en cas de succès commercial.

#### 4.1.2 Les évolutions des différentes réglementations antipollutions

Depuis les années 90, les pays industrialisés ont mis en place des réglementations limitant les émissions de polluants atmosphériques. Les priorités portent aujourd'hui sur les émissions de particules et d'oxydes d'azote (NO<sub>x</sub>). Des systèmes de contrôle de la combustion, de post-traitement des gaz d'échappement et de gestion de l'utilisation du moteur, tel que le Stop-Start, sont souvent nécessaires aux véhicules neufs à moteur thermique, augmentant leur coût de fabrication. Ces réglementations affectent particulièrement les moteurs Diesel. Des restrictions de circulation, en fonction du niveau d'émissions homologué de chaque voiture, sont déjà en place dans quelques villes et pourraient s'étendre. Des restrictions additionnelles interviendront aussi lors de pics de pollution atmosphérique.

Une volonté de plus en plus marquée de réduire les GES va également à l'encontre de la voiture thermique. Par exemple, l'Union Européenne impose une limite de 130 g/km de CO<sub>2</sub> sur 65% des

ventes des constructeurs à partir de 2012 et annonce son souhait d'implémenter ultérieurement une limite à 95 g/km. Des amendes seraient appliquées en cas de dépassement ; les constructeurs auraient à payer 95 € par véhicule vendu pour chaque g/km de CO<sub>2</sub> supplémentaire. Selon une analyse, ces nouvelles règles entraîneraient une hausse moyenne du prix des voitures de 1.300 euros.

L'ensemble de ces contraintes sur les voitures thermiques favorisent le développement des ZEV.

Maurizio Maggiore, de la Commission Européenne, lors du Forum sur la mobilité future le 10 mars 2009 :

«Crise économique ou pas, nous ne pouvons pas nous permettre de stopper aujourd'hui le développement technologique. Parce qu'une crise environnementale majeure se prépare. Alors, que ce soit pour de nobles raisons écologiques, ou pour des considérations strictement opportunistes de sécurité énergétique, la voiture verte est là. Et elle est là pour rester! La seule chose qui reste à déterminer est qui va la produire et la mettre sur le marché. Les Etats-Unis ont déjà appris que mettre en avant des technologies dépassées était une stratégie à hauts risques... »

#### **4.1.3 Les volontés politiques et industrielles**

Le marché des ZEV peut être porté par une volonté de sortir de la domination du pétrole. De nombreux contrats ont déjà été signés engageant des gouvernements, des constructeurs, des énergéticiens et des sociétés de service. Par exemple, l'Etat d'Israël a conclu un accord le 21 janvier 2008 avec Better Place et l'alliance Renault-Nissan pour la commercialisation en grand volume de voitures ZEV.

D'autres pays sont motivés par l'opportunité de devenir des acteurs majeurs de l'industrie automobile alors que leur niveau industriel et technologique actuel les handicape à l'exportation de voitures à moteur thermique. La voiture électrique leur donne la possibilité d'attaquer ce marché sans retard technologique. La Chine et l'Inde font partie de ces pays ; le gouvernement chinois s'est fixé l'objectif que 50% des véhicules commercialisés dans le pays en 2020 soient électriques

Enfin, l'intérêt de la voiture ZEV n'a de sens écologique que si la production électrique apporte de vrais gains en termes de pollution de l'air et de rejets de CO<sub>2</sub>. Elle n'est crédible qu'avec un réseau à proportion élevée de centrales nucléaires et/ou à sources d'énergie renouvelable, voire au gaz naturel.

#### **4.1.4 Les volontés locales**

Le marché des flottes captives urbaines et périurbaines est particulièrement bien adapté aux caractéristiques des véhicules électriques. Une seule structure pour la recharge sur leur lieu de garage ou de stationnement étant suffisante, il n'est pas nécessaire d'investir dans de nombreuses bornes sur leur parcours. Ce marché peut être constitué des différents services de livraison en ville (courrier, denrées alimentaires, matériel, etc.), d'assistance ou de transport de personnes (taxis, minibus, autopartage).

Les caractéristiques des voitures électriques correspondent également à une grande partie des besoins des particuliers. Quelques accords existent déjà avec des autorités locales comme en Californie ou au Japon. Le marché de la voiture électrique pourra mieux monter en puissance si, suivant l'exemple de La Rochelle (France), de nombreuses grandes villes adhèrent à ce service en investissant dans un parc d'automobiles spécifiques et dans un réseau de stationnement avec bornes de recharge.

#### **4.1.5 Les attentes et besoins des clients**

Le marché de la propulsion électrique est dépendant de l'accueil que lui réserveront les utilisateurs. Les voitures électriques peuvent fournir des prestations de confort, de sécurité et de dynamisme équivalentes ou supérieures à celles de voitures conventionnelles. Toutefois, deux sujets sensibles risquent de nuire à l'expansion du marché du VE : l'autonomie et les coûts. Il conviendra donc de vérifier si l'autonomie de chaque produit est bien acceptée et comprise des utilisateurs. Un réseau de bornes de recharge rapide (ou d'échange des batteries) facilitera l'emploi du VE et répondra aux inquiétudes de certains. En outre, les besoins du client et la possibilité de posséder une ou deux voitures dans une famille influent sur le type de véhicule ZEV.

Comme brièvement mentionné sous 3.5.1, les frais kilométriques d'un VE peuvent être 4 à 6 fois inférieurs à ceux d'un véhicule thermique, mais ceux liés à la fourniture des batteries sont très élevés. Il

est probable que l'offre tende vers des systèmes de location du pack de batteries ou de la voiture. Des primes à l'achat et/ou des aides à l'utilisation de la part de la collectivité pourraient être intégrées dans cette optique, à condition que les Etats soient capables de compenser la baisse des revenus issus des taxes sur les carburants.

#### 4.1.6 La peur du changement

Une part de la population est toujours plus ou moins réticente au changement, par conformisme, par difficultés d'adaptation ou par perte de repères. Cette contrainte introduit une inertie au développement des ventes d'un nouveau concept. Notons également que la commercialisation de ZEV entre en concurrence avec une partie des industries économiquement liées au pétrole.

#### 4.1.7 Un marché encore sensible aux événements extérieurs

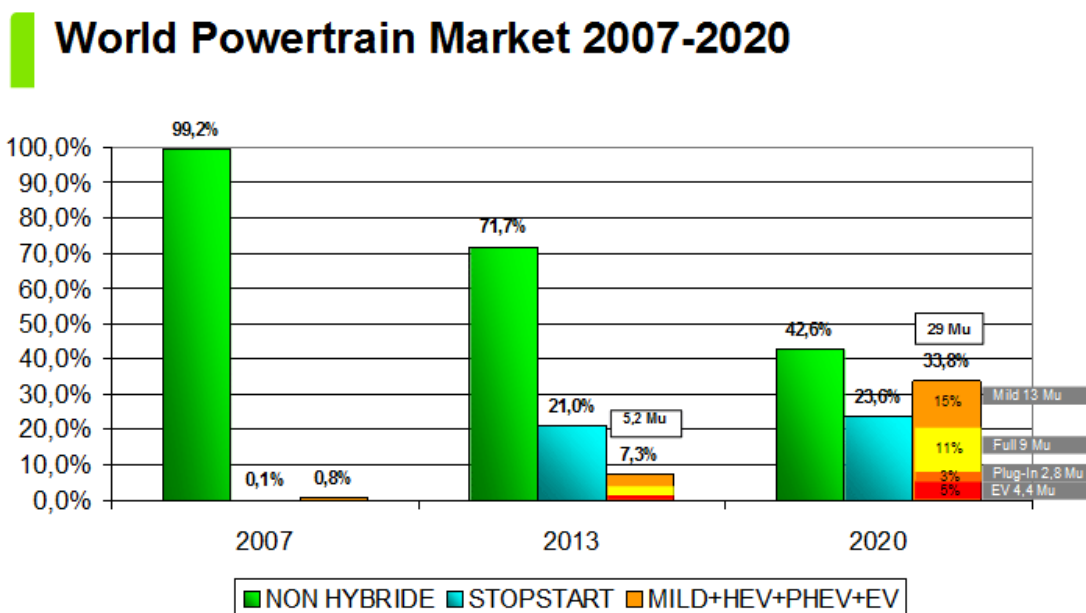
La demande en ZEV peut varier fortement et rapidement face à des bouleversements majeurs. Elle pourrait s'accroître à la suite d'une catastrophe écologique s'il paraissait évident qu'elle est liée au réchauffement climatique. Une part non négligeable de la population pourrait alors limiter spontanément toute consommation rejetant du CO<sub>2</sub>. Il en serait de même en cas de vives tensions géopolitiques avec des pays gros exportateurs de pétrole.

A l'opposé, d'autres types d'événements pourraient freiner le développement des ZEV. Par exemple, une longue et profonde crise économique pourrait favoriser les ventes de voitures à très bas coût, segment où les ZEV ne peuvent être présents en l'état actuel de la technologie, notamment celle des batteries. Autre risque, une mauvaise image de ce type de véhicule freinerait ses ventes, par exemple suite à un accident dramatique (explosion d'une batterie, électrocution, etc.).

### 4.2 Estimations du marché

De nombreuses prévisions divergentes du marché des ZEV apparaissent, allant des plus optimistes au plus pessimistes. Certaines, parmi les plus optimistes, avancent que 25% des voitures vendues dans le monde pourraient être électriques en 2020 et 50% en 2050.

Estimation Valeo :



en revanche, d'autres études estiment que le marché européen en 2015 sera à 250.000 voitures électriques seulement.

Ces divergences sont compréhensibles étant donné qu'il est difficile de prédire des chiffres fiables vu la complexité induite par l'entrelacement des nombreux paramètres entrant en jeu. Quoiqu'il en soit, en 2020, la production de voitures à moteur thermique sera encore largement majoritaire. De nombreuses

technologies, commercialisées en grand volume, diminueront les émissions de CO<sub>2</sub> en améliorant le rendement du moteur et en optimisant son utilisation. La fonction Stop-Start et les propulsions mild hybrides et full hybrides seront largement diffusées. Valeo estime qu'en 2020 les voitures électriques (BEV et REBEV) devraient représenter 5% du marché mondial, soit 4,4 millions d'unités, et que la voiture hybride rechargeable (PHEV) sera à 3% du marché mondial, soit 2,8 millions d'unités. Ce volume serait réparti sur 4 principaux marchés: la Chine, l'Europe, l'Amérique du Nord et le Japon.

## 5 Les défis technologiques

### 5.1 La première génération (2009-2010)

#### 5.1.1 Une technologie majeure : la batterie au lithium

Le saut technologique majeur inhérent aux voitures électriques de première génération actuellement en cours de commercialisation est un nouveau type de batteries, au lithium-ion. Le lithium, un métal alcalin mou, est la matière solide la plus légère (masse volumique de  $535 \text{ kg/m}^3$ ). C'est en fait le sel de lithium sous forme liquide qui est utilisé pour l'électrolyte. Depuis leur première commercialisation par Sony Energitech en 1991, les batteries lithium-ion (li-ion) se sont rapidement imposées dans les petits équipements portables tels que les téléphones et ordinateurs.

Celles prévues pour l'automobile pourvoient une grande énergie massique (entre 150 et 180 Wh/kg) et volumique (entre 120 et 160 Wh/litre) hors dispositifs périphériques tels que le boîtier de protection ou l'électronique de gestion et de sécurité. Ces performances diffèrent principalement selon les avancées et les familles de batteries. Par comparaison, les batteries au plomb délivrent 30 à 40 Wh/kg et celles au Nickel-Hydrures métalliques (NiMH), largement employées dans les voitures hybrides actuelles, entre 80 et 110 Wh/kg. L'avantage des batteries li-ion est dû à la tension élevée fournie par chaque élément électrochimique : de 3,1 à 3,7 volts selon les technologies comparés aux 1,2 volt des types NiMH. Par rapport à ces derniers, près de 150 kg et un espace de 100 litres peuvent être gagnés à énergie embarquée équivalente. Les batteries li-ion procurent également une puissance de charge et de décharge élevée et elles n'ont pas d'effet mémoire imposant une décharge complète après plusieurs cycles d'utilisation, opération nécessaire pour éviter une baisse de capacité de stockage. Le lithium est disponible en grande quantité à différents endroits de la planète, avec une forte prédominance de l'Amérique latine, notamment en Argentine, Chili et Bolivie, et une seconde source dans plusieurs régions asiatiques dont le Tibet.

En contrepartie, la technologie li-ion nécessite plusieurs dispositifs de sécurité qui accroissent l'encombrement, le poids et le coût. Une batterie a un fonctionnement optimal entre 0 et 40°C. Il est donc nécessaire d'adjoindre un système de climatisation ou un circuit de refroidissement, généralement assuré par la circulation d'un liquide entre un échangeur thermique et le bac de batteries. Celles-ci doivent aussi résister aux chocs et aux vibrations inhérentes aux véhicules routiers, notamment par un système d'amortissement incorporé à leur boîtier.

Plusieurs types de batteries lithium-ion sont disponibles, avec quelques différences en termes de coût et d'énergie massique. Elles diffèrent principalement par la conception de leur cathode : manganèse, lithium/nickel/cobalt/Manganèse, nickel/cobalt/aluminium ou phosphate. Enfin, si les batteries lithium-ion polymère et lithium métal polymère fournissent moins d'énergie massique, elles ont l'avantage de la grande sécurité apportée par leur électrolyte en polymère gélifié, donc non liquide.

#### 5.1.2 Evolution de l'architecture du véhicule

Les nouvelles voitures électriques BEV ont des autonomies allant de 80 à 250 km, mais ces chiffres ne sont pas directement comparables en raison du manque de standard des procédures de test (vitesse stabilisée, cycle urbain propre à un constructeur, cycle 10-15 Japon, norme américaine FTP 72, etc.). Pour assurer 250 km d'autonomie, la Bolloré Bluecar qui sera commercialisée à la fin 2010 embarquera des batteries lithium métal polymère d'une capacité totale de 30 kWh, soit 300 kg en comptabilisant les dispositifs périphériques. Comme sur une majorité de BEV, ses batteries sont disposées au plus bas entre les essieux afin de procurer d'excellentes prestations dynamiques. Sur quelques autres projets, les batteries sont logées dans le coffre par manque de place. Dans tous les cas, châssis et trains roulants doivent être configurés en conséquence.

La Bolloré Bluecar dispose également d'ultra-capacités qui permettent d'emmagasiner et de restituer de façon répétée des puissances électriques élevées, soit 20 kW/kg (entre 300 et 2000 W/kg pour les batteries lithium-ion, Hitachi venant d'annoncer une nouvelle génération à 4500 W/kg). Cette caractéristique se marie parfaitement avec les très nombreux cycles de charge/décharge lors des phases de récupération et de restitution d'énergie. Les ultra-capacités sont un bon complément aux batteries lithium-ion dont la puissance est inversement proportionnelle à leur capacité de stockage.

Cette dernière caractéristique n'est que d'environ 5 Wh/kg pour les ultra-capacités (comme indiqué plus haut, celle des batteries lithium-ion se situe entre 150 et 180 Wh/kg).

Le temps de recharge des batteries est un point critique. Plusieurs constructeurs ont annoncé une recharge de 80% en 30 minutes sur des bornes à fort ampérage, ce qui est certainement suffisant pour une utilisation urbaine (le temps de faire les courses), mais insuffisant pour un long parcours, même si cette utilisation n'est pas la vocation première d'une VE. Better Place, qui a conclu des accords avec l'Alliance Renault-Nissan, propose un schéma de fonctionnement totalement différent : l'échange automatisé des 250 kg de batteries par des robots. Une démonstration, effectuée à Yokohama le 12 mai 2009, montre que cette opération peut être réalisée en 1 minute et 13 secondes. Les batteries en stock sont rechargées par le réseau et par des panneaux photovoltaïques. Cependant, en raison du coût élevé du stock de batteries, la viabilité économique de ce concept doit être démontrée.

Hormis le passage aux batteries lithium-ion, les technologies d'une chaîne de traction électrique sont en partie issues de celles des voitures hybrides les plus récentes : moteur électrique, onduleur, convertisseur de tension, gestion électronique de la puissance, etc. Les hybrides rechargeables disposent également d'une nouvelle option de la chaîne de traction : l'essieu avant transmet la puissance du moteur thermique et l'essieu arrière celle d'un moteur-générateur électrique. Ce concept permet un montage de type parallèle des moteurs sans toutefois modifier le groupe motopropulseur thermique. Il apporte également la transmission intégrale.

La majorité des moteurs sont du type synchrone à aimants permanents, bien que quelques projets prévoient des moteurs asynchrones. L'onduleur, qui assure la conversion du courant continu en alternatif triphasé entre les batteries et le pilotage du moteur, présente un rendement compris entre 85 et 92%. Une amélioration de ce rendement aura des conséquences directes sur la consommation électrique et l'autonomie, ainsi que sur le système de refroidissement. Des évolutions sont déjà perçues sur les véhicules hybrides, par exemple l'augmentation de la tension de travail des moteurs de 350 à 600 volts. Les onduleurs les plus récents reçoivent un refroidissement liquide sur leurs deux faces afin de mieux évacuer l'énergie perdue. L'industrie automobile attend par ailleurs une baisse du poids et de l'encombrement global de l'onduleur. Actuellement, l'électronique de puissance d'une voiture électrique de 80 kW pèse quelque 20 kg et occupe un volume d'environ 10 dm<sup>3</sup>.

## **5.2 La seconde génération (2013-2014)**

### **5.2.1 Chaîne de traction**

Des développements sur les batteries au lithium sont nécessaires pour abaisser leur coût et augmenter leur énergie massique. Cependant, ces deux critères sont inversement corrélés et les progrès seront le résultat de compromis. L'industrie chinoise souhaite se positionner comme un leader des batteries à bas coût, mais la technologie utilisée ne fournirait que 120 Wh/kg. A court terme, il n'y a pas de profondes évolutions à attendre sur les performances des batteries, mais leur potentiel de progression est élevé à long terme.

Plusieurs projets montrent également qu'il est possible de prolonger l'autonomie avec des panneaux photovoltaïques sur le toit. La conversion des rayonnements solaires, énergie gratuite, en électricité peut apporter une énergie journalière allant jusqu'à 1,5 kWh si la voiture reste exposée à la lumière du jour par beau temps. La dernière génération de la voiture hybride Toyota Prius dispose déjà de ces panneaux d'une puissance de 56 W, mais uniquement pour alimenter la ventilation de l'habitacle. Des évolutions de cette technologie permettent d'espérer d'atteindre 120 W/m<sup>2</sup> à moyen terme et une connexion avec le système de charge des batteries afin d'allonger l'autonomie. Le projet Bolloré annonce un gain pouvant atteindre 15% dans les cas les plus favorables. Autre point, lors d'un freinage appuyé, il n'est pas encore possible de récupérer la totalité de l'énergie cinétique en raison de la puissance limitée du moteur-générateur et des batteries. Des progrès dans ce domaine apporteraient un prolongement notable de l'autonomie, particulièrement en zone urbaine.

Les plus grands progrès à court terme viendront de la gestion électronique des moteurs. En effet, si ces moteurs offrent aujourd'hui d'excellents rendements, ce n'est pas encore le cas de leur onduleur et de leur convertisseur de tension. Selon la méthodologie EPA en vigueur aux Etats-Unis, General Motors annonce une consommation de sa Volt (voiture de type REBEV) de 25 kWh pour 100 miles en ville, soit 160 Wh/km, une valeur qui sera très inférieure sur les véhicules de seconde génération. Une

amélioration du rendement passera par une réduction de l'intensité traversant l'électronique de puissance et, en conséquence, par une élévation de la tension. De nouvelles technologies permettront également de réduire la masse et l'encombrement de l'électronique de puissance. Les moteurs devront quant à eux gagner en puissance massique et volumique. En outre, certaines applications pourraient recevoir une transmission à 2 rapports afin d'optimiser le rendement de la chaîne de traction sur une plage de vitesse élargie.

Une plateforme dédiée permettra de repenser intégralement l'architecture de la voiture en termes de répartition des volumes, jusqu'à l'emploi de moteurs dans les roues. Le cabinet Frost & Sullivan prédit que ce concept ECM (Electric Corner Modules) devrait représenter un million d'unités en Europe en 2020. Cette rupture technologique, déjà présentée dans de nombreux concept-cars, apporte un gain substantiel en encombrement et permet un remodelage profond de l'architecture automobile. La partie mécanique est aussi simplifiée : plus de différentiel, contrôle de stabilité dynamique facilité et transmission 4 roues motrices allégée et compacte. La réduction de contraintes locales dans la coque amènera par ailleurs une baisse de son poids. Ce concept doit néanmoins relever plusieurs défis technologiques. En raison de l'absence de différentiel, une gestion globale du comportement dynamique, intégrant le contrôle de stabilité, devra gérer la répartition des couples entre chaque moteur. Un point critique est la forte augmentation du poids non suspendu, obstacle qui peut être levé par une suspension active électrique.

### **5.2.2 Equipements de confort et de sécurité**

La nécessité de réduire la consommation des voitures électriques répond à un double objectif : accroître leur autonomie et réduire la quantité de batteries embarquées, et en conséquence leur coût et leur poids. Toute réduction de poids d'un organe engendre un cercle vertueux en permettant dans une certaine mesure un allègement des structures du véhicule et donc un allègement total supérieur à celui de l'organe allégé, ce qui procurera une plus grande autonomie. D'autre part, la diminution de consommation ne se fera pas uniquement par les améliorations de la chaîne de traction, mais également par une optimisation des équipements de confort et de sécurité.

Le chauffage électrique alimenté par la batterie, basé sur l'effet Joule avec la technologie actuelle des éléments CTP (Coefficient de Température Positif) est une possibilité, mais qui impacte directement l'autonomie. Divers développements permettront de récupérer les pertes d'énergie de la chaîne de traction (batteries, électronique de puissance et moteur) pour chauffer l'habitacle. Une autre voie est l'utilisation du principe de la pompe à chaleur, obtenue à partir d'un système de climatisation modifié.

L'autre équipement énergivore est la climatisation ; les équipementiers devront donc proposer un système optimisé en termes de consommation. Cet objectif est d'autant plus difficile à atteindre qu'à partir du 1er janvier 2011, les systèmes de climatisation à base de gaz fluorés à effet de serre dont le potentiel de réchauffement planétaire est supérieur à 150 seront interdits en Europe dans les nouveaux véhicules. Cette loi interdit de fait le R134a actuellement employé. Parmi les solutions, le fluide HFO 1234 est en bonne position car il demande un faible investissement. L'alternative est le fluide R734a qui offre le grand avantage de présenter un meilleur rendement, mais pour un coût plus élevé. Des habitacles plus isolés thermiquement limiteraient également les échanges avec l'air extérieur et les rayons du soleil. Une prestation intéressante serait un dispositif de commande à distance du chauffage et de la climatisation permettant de préparer l'habitacle lors des périodes de recharge sur réseau, donc sans puiser l'énergie des batteries.

Les équipements qui reçoivent une assistance devront également s'adapter. La consommation de l'assistance de direction, désormais électrique et d'un meilleur rendement que les anciens systèmes hydrauliques, devra encore être abaissée. Alternativement, un véhicule relativement léger avec une répartition des masses ne chargeant pas trop l'avant pourrait s'en passer. L'assistance de freinage, qui puisait son énergie dans la dépression créée à l'admission (moteur à essence) ou dans une pompe à dépression (moteur Diesel), devra s'orienter vers l'énergie électrique. Il est également probable que, à plus long terme, la commande des freins devienne totalement électrique (brake-by-wire). L'étrier à piston hydraulique sera alors remplacé par un moteur électrique piloté par un calculateur qui assurera lui-même l'assistance et la répartition des forces de freinage entre les roues, de même que toutes les fonctions d'un système de contrôle de stabilité.

Enfin, l'éclairage est un autre consommateur qui peut dépasser les 400 W. La généralisation des feux au xénon et/ou des différents éclairages à LED (Light Emitting Diode ou Diodes Electro Luminescentes) apportera une solution acceptable même si leur coût reste élevé. Par ailleurs, la plus grande part de la puissance électrique de l'éclairage sur un cycle moyen d'utilisation de la voiture est consommée par les feux diurnes, obligatoires dans un nombre grandissant de pays. Les LED semblent la meilleure technologie pour cette fonction.

## 6 Une coordination nécessaire entre différents acteurs

Le déploiement de voitures électriques ne dépend pas uniquement de leur développement technique, mais également d'un ensemble de prestations nécessaires à leur fonctionnement. Tous les prestataires doivent coordonner leurs actions pour offrir à l'utilisateur final un produit fonctionnel, attractif et mature.

« Il ne faut pas reproduire l'erreur faite dans les années 1990 lorsqu'on avait beaucoup travaillé sur la technique mais pas au service après vente ».  
Propos tenus le 17 février 2009 par Chantal Jouanno, secrétaire d'Etat chargée de l'Ecologie du Gouvernement français.

### 6.1 L'industrie automobile

Les rapports de force entre les industriels de l'automobile risquent de subir des changements. Aujourd'hui, le Japon est en avance pour fournir en grand volume des véhicules électrifiés, avance gagnée par un engagement précoce sur la voiture hybride – à commencer par la Toyota Prius – puis électrique pure (Mitsubishi, Nissan, Subaru). Conscient de ce retard, les Etats-Unis ont lancé un programme d'aide massive pour que les constructeurs américains rattrapent le niveau technologique de leurs concurrents. L'Union Européenne est plus réservée ; le risque d'une mise en retrait technologique de ses constructeurs est à craindre s'ils ne peuvent pas, eux aussi, bénéficier des mêmes avantages.

Le développement et l'industrialisation de véhicules électriques demandent un programme très ambitieux. Un soutien des Etats est essentiel pour permettre de développer simultanément deux générations de véhicule. La première, qui atteindra le marché dès 2011, devra amorcer et accroître la demande. La deuxième, prévue pour une commercialisation à partir de 2014, aura la lourde tâche de rendre les ZEV compétitifs sans incitations fiscales. Faute d'un développement simultané de ces deux générations, il est à craindre que les Etats ne puissent plus assumer la charge des incitations fiscales dans un marché qui aura décollé. L'extension de ce marché risquerait alors d'être brisée, les investissements consentis pour le déploiement des infrastructures ne pourraient être rentabilisés et la clientèle ciblée serait déçue.

Concernant la répartition de ces aides éventuelles, il ne faudra surtout pas oublier les équipementiers de rang 1, de même que leurs partenaires. Ce sont des acteurs majeurs de l'industrie automobile qui apportent une contribution fondamentale à l'innovation par l'adaptation de leurs produits et composants essentiels au véhicule électrique. Ils sont partie intégrante de la chaîne de l'innovation, tout autant que les constructeurs.

Du côté de la technique, les composants doivent être optimisés non pas individuellement mais en association avec l'ensemble de la chaîne de traction. Les équipementiers et constructeurs concernés doivent travailler de concert afin de fournir un ensemble cohérent et performant, en tenant compte du fait que l'intégration de cette chaîne de traction dans le véhicule implique une remise en cause des répartitions de poids et de volume ainsi que des systèmes de confort et de sécurité.

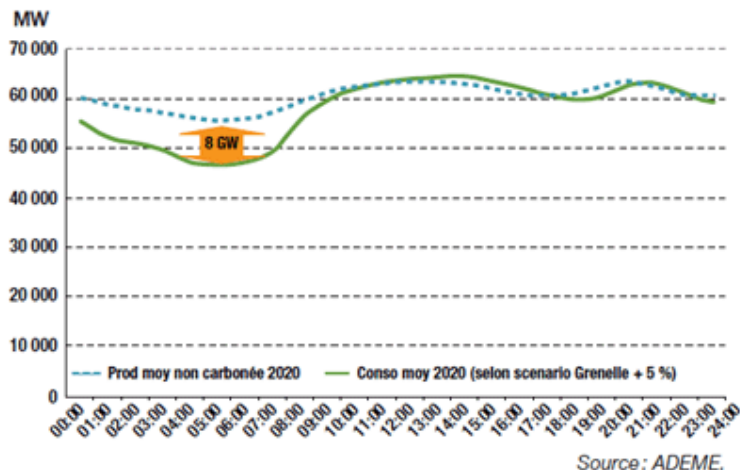
La normalisation des nouvelles technologies est essentielle, notamment en ce qui concerne la définition des prises électriques et des caractéristiques du courant. Une coordination entre les industriels et les gestionnaires des infrastructures est dès lors nécessaire. Si le concept de remplacement automatisé des batteries se développe, tant les sociétés assurant ce service que les constructeurs entre eux devront standardiser le produit. Enfin, les constructeurs et les autorités doivent établir des normes permettant de comparer valablement l'autonomie ainsi que la consommation des véhicules REBEV en mode thermique.

### 6.2 Les énergéticiens

La création d'un parc de voitures électriques impose-t-elle la construction de nouvelles centrales électriques ? La réponse varie selon les pays car les potentiels de production électrique actuels sont très disparates. Par exemple, la consommation électrique annuelle par habitant en 2006 était de 2.179 kWh en Chine, de 5.828 kWh en Europe, de 7.702 kWh au Japon et de 12.924 kWh aux USA selon

l'IEA (International Energy Agency). L'introduction d'un parc d'automobiles électriques aura donc des conséquences différentes d'un pays à l'autre.

Une étude de l'agence française ADEME (agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie) indique que l'impact de la recharge d'un parc de voitures électriques dépend fortement du modèle de recharge. Le modèle le plus pertinent est la recharge nocturne réalisée chez le particulier car la demande en courant électrique est la plus faible à cette période. Dans ce cas, l'ADEME estime qu'un parc de 4 millions de véhicules pourrait être géré en France en 2020 uniquement avec une



production non carbonée, soit un volume très largement au-dessus de toutes les prévisions de vente de voitures électriques. Par contre, un très grand nombre de recharges rapides (donc à puissance plus élevée) de jour pourraient imposer l'importation de courant lors des périodes de fortes consommations (ex. : jours de grand froid). La situation deviendrait évidemment problématique si tous les pays voisins se retrouvaient dans les mêmes conditions. Ces recharges pourraient également provoquer des baisses de tension qui ne seraient évitées que par le démarrage de centrales maintenues en stand by, probablement des centrales thermiques. Ce problème concerne également le modèle par remplacement automatisé des batteries car il pourrait impliquer une consommation élevée les jours de grande circulation (ex. : départ en vacances).

Une autre étude aux Etats-Unis, réalisée par le laboratoire NREL (National Renewable Energy Laboratory) du Département de l'énergie, arrive aux mêmes conclusions en ce qui concerne la charge nocturne. Elle ajoute qu'une pénétration de 50% de véhicules hybrides rechargeables (PHEV) n'augmenterait la demande électrique par habitant que d'environ 5 à 10% et qu'elle n'imposerait pas de capacités de production supplémentaire. Cette étude a été réalisée avec pour hypothèse l'utilisation de véhicule PHEV capable d'une autonomie de 20 miles en mode électrique.

Les problèmes de consommation électrique lors de la charge qui apparaîtraient à moyen terme doivent être pris en compte par une bonne coordination des offres de la part des constructeurs et des instances gouvernementales. Si le tarif de l'électricité est déjà réduit sur une partie de la nuit dans une majorité de pays, il serait par exemple bénéfique de proposer aux utilisateurs (particuliers et entreprises) un différentiel de prix encore plus attractif pour la charge lente sur ce créneau horaire.

L'impact de la recharge du véhicule électrique sur le réseau est complexe et étudié sous toutes ses formes par les énergéticiens. Par exemple, l'énergéticien allemand E.ON a lancé le projet « Evaluation des avantages d'un système de double utilisation du stockage électrique » (Assessing the System Benefits of Dual Use Electricity Storage) dans le but d'étudier les bénéfices d'une interconnexion d'un très grand nombre de batteries de véhicules électriques lors de leur recharge. Cet énergéticien présent dans une majorité de marchés de l'hémisphère nord pense ainsi que ce réseau pourrait par exemple servir de réserve d'énergie capable de lisser les pointes et les creux de consommation. Ce concept nécessite la mise en œuvre de réseaux électriques bidirectionnels capables de gérer les sécurités, le fonctionnement et la tarification.

### 6.3 Les gestionnaires des infrastructures

La mise en place d'une infrastructure complète de recharge concerne à la fois les moyens de distribution, la sécurité et la facturation. Les moyens de distribution définissent le type de borne de recharge, leur implantation, leur nombre et leur accessibilité. Cet ensemble ne peut être mis en place que par une bonne coordination entre les pouvoirs publics, les énergéticiens, les constructeurs et les sociétés de service. La clé de la réussite de l'installation d'une infrastructure est son financement. Les

coûts sont élevés, ce qui constituera une barrière majeure au déploiement de voitures électriques. Selon les besoins et les volontés nationales ou locales, ce financement peut être pris en charge par un acteur ou réparti entre plusieurs collectivités et des entreprises de service et de transport. Plusieurs contrats ont déjà été conclus dans différents pays et quelques villes.

Par exemple, le gouvernement israélien, en coopération avec la société californienne Better Place et suite à l'accord passé avec le constructeur Renault-Nissan, va constituer un réseau de 500.000 stations de recharge de batteries dans tout le pays dès 2011.

Le Comté de Maricopa, en Arizona, a conclu un engagement avec la société de transport et de technologies de stockage d'électricité ECOtality pour la mise en place d'infrastructures de recharge. Ce contrat inclut le programme appelé EV Micro-Climate qui coordonne les organisations gouvernementales, les services publics, les constructeurs automobiles, les organisations régionales et stratégiques pour favoriser la réussite de l'adoption de voitures raccordées au réseau électrique. Ce programme inclut également une forte sensibilisation du public.

En région parisienne, 100 voitures et utilitaires légers électriques de l'alliance Renault Nissan seront expérimentés à partir de septembre 2010 et pendant un an. Les clients particuliers, professionnels et employés de collectivités territoriales disposeront d'une infrastructure de charge (domicile, locaux des entreprises, parkings et voie publique) développée en collaboration avec l'énergéticien EDF. Une expérimentation de la même ampleur est en cours en Autriche. Ce projet appelé Vlotte utilise une centaine de véhicules, en majorité des Th!nk, mais également des versions « électrifiées » des Renault Twingo, Fiat Panda, Fiat 500 et Mazda 2.

Les engagements qui se multiplient aujourd'hui montrent que le déploiement des infrastructures ne se fait qu'en bonne coordination entre les différents acteurs de la filière.

#### 6.4 Les Etats et les collectivités

Afin d'assurer le lancement commercial des véhicules électriques, les collectivités peuvent également apporter une aide en s'engageant à acheter un volume conséquent de ces véhicules. Ce principe a par exemple été largement usité au Japon pour le lancement des voitures hybrides et il l'est actuellement pour le développement de voitures à pile à combustible. La Chine et les Etats-Unis emploient également cette pratique. En France, une lettre d'intention a été signée entre l'État et plusieurs entreprises (La Poste, EDF, Vinci, Veolia, France Télécoms, GDF Suez) en vue d'un achat groupé de 100.000 véhicules électriques sur 5 ans. L'organisation de campagnes informatives ou incitatives du grand public sur les avantages, tant individuels que sociétaux, de la mobilité zéro émission sera également intéressante.



Il est par ailleurs étonnant de voir les pouvoirs publics américains traduire actuellement la consommation des voitures électriques à batteries en consommation d'essence ! Le Département de

l'Energie effectue ainsi un calcul selon le cycle EPA urbain et route qui prend en compte tous les paramètres (rapports énergétiques, rendements, énergie consommée du puits au réservoir, etc.) et ajoute également un bonus en cas de non consommation de carburant fossile. La Mini-e, version BEV de la Mini, est ainsi affublée d'une étiquette indiquant « 33 kWh/100 miles (équivalent to 102 MPG) » en mode City – soit 2,3 l/100 km. Le coefficient appliqué est 82,049 Watt-heure par gallon.

La cohabitation entre véhicules thermiques et électriques pose un problème de financement des infrastructures routières (routes, ponts, systèmes d'information, etc.). Ces coûts sont pris en charge par les Etats qui les répercutent en partie par des taxes sur les carburants à usage routier. Serait-il alors équitable que seuls les véhicules thermiques soient taxés pour financer l'entretien et le développement du réseau routier ? L'Etat pourrait prélever une partie des recettes perçues par les prestataires collecteurs qui gèrent les paiements aux bornes de recharge, mais la question de ce prélèvement reste toutefois posée dans le cas de recharge chez les particuliers.

## 6.5 Les nouveaux acteurs

Le processus de déploiement de la voiture électrique verra une confrontation entre les constructeurs déjà en place et de nouveaux. Les premiers font aujourd'hui face à la sévèrisation des normes sur les émissions de polluants et de réduction de consommation des voitures à moteur thermique. Ce challenge technique, ayant également un impact sur le coût du produit final, forme en contrepartie une barrière pour d'éventuels concurrents qui doivent composer avec un certain retard technologique. La voiture électrique lève cette barrière et présente donc un risque important pour les constructeurs en place. Il en est de même pour leurs équipementiers spécialisés (échappement, fonderie, pièces moteur, etc.) qui verront une baisse du chiffre d'affaires lié au moteur thermique. Cette opportunité sera saisie par de nouveaux constructeurs et de nouveaux équipementiers, par exemple pour la fourniture de moteurs ou d'électronique de puissance. C'est également une opportunité pour des pays en voie de développement, notamment l'Inde et la Chine. Pour ce dernier pays, l'engagement dans la voie de la voiture électrique permettra également de limiter l'impact écologique de son développement : la taille de son marché automobile devrait être multipliée par dix entre 2005 et 2030. Certains de ses constructeurs pourraient alors se classer parmi les 10 plus grands mondiaux, notamment dans le marché de la voiture électrique.

Les fournisseurs de batteries, s'ils sont généralement des industriels reconnus ou issus de coentreprises entre spécialistes, n'ont pas encore tous une activité dans le domaine automobile. Etant donné l'importance de la batterie dans ce type de véhicule, tant en termes économiques que techniques, ces nouveaux entrants occuperont une place notable et croissante dans l'industrie automobile (et également dans bien d'autres industries). Cette place se fera aux dépens de la puissante industrie pétrolière. Une des tendances est le partenariat technique et financier entre fournisseurs de batteries, constructeurs et équipementiers pour assurer des développements communs. Le produit de base qu'est la batterie se transforme en un ensemble pack batteries assurant également les fonctions de gestion de fonctionnement et de sécurité.

Enfin, si les sociétés de location vont investir ce nouveau marché, de nouvelles entreprises de service verront le jour pour l'installation des infrastructures, leur financement et/ou les moyens de paiement.

## 7 Les offres produits Valeo : des ZEV pour tous

Valeo, en collaboration avec ses partenaires Leroy-Somer et GKN, développe une gamme de chaînes de traction de deuxième génération à prix abordable. L'objectif est que le coût de l'ensemble moteur électrique, onduleur, chargeur, convertisseur de tension et démultiplication finale soit à terme équivalent à celui du groupe motopropulseur à essence (moteur, boîte de vitesses, démultiplication finale et différentiel) qu'il remplace. Un coût contenu est en effet une condition majeure pour que les voitures électriques et hybrides rechargeables de seconde génération soient distribuées en grand volume de façon économiquement viable sans aides gouvernementales à l'achat.

Ce travail sur les prix de revient porte sur 3 leviers :

- La réduction du coût du groupe motopropulseur (GMP) électrique.
- La consommation d'énergie. À autonomie équivalente, une réduction de consommation permet de diminuer la capacité des batteries, donc leur coût et leur poids. Cette réduction de la consommation concernera le GMP électrique, mais également la gestion thermique de l'habitacle et de l'éclairage.
- L'augmentation de la durée de vie des batteries par une gestion thermique performante et un lissage des pointes de consommation de courant.

Par ailleurs, les puissances massique et volumique de cette gamme de chaînes de traction, prévues pour être commercialisées dès fin 2012 seront également supérieures à celles de première génération.

### 7.1 Le consortium pour une filière française

Afin de devenir un leader mondial de la chaîne de traction électrique, Valeo a conclu des accords de développement avec des partenaires industriels de renom. Un développement conjoint permet de sélectionner les meilleurs compromis technologiques entre les différentes spécialités afin de fournir un produit final parfaitement abouti. Outre Valeo, ce consortium réunit des équipementiers parmi les plus réputés dans leur domaine : Leroy-Somer, Johnson Controls-Saft, GKN, Michelin et Leoni.

- Valeo est un groupe industriel indépendant, entièrement dédié à la conception, à la fabrication et à la vente de composants et de systèmes pour l'automobile, poids lourds compris. Le Groupe Valeo, qui se classe parmi les premiers équipementiers mondiaux, fournira l'électronique de la chaîne de traction et la gestion thermique du véhicule.
- Leroy-Somer est un des leaders mondiaux en systèmes d'entraînement et alternateurs industriels. Doté d'une longue expérience dans la motorisation de véhicules électriques, Leroy-Somer fournira des moteurs électriques à très haut rendement avec des avantages décisifs en termes de compacité et de poids.
- Johnson Controls-Saft est une coentreprise entre un leader en batteries et l'un des plus grands équipementiers de la branche automobile. Un grand nombre de véhicules hybrides embarquent aujourd'hui des batteries produites par le Groupe. Johnson Controls-Saft fournira le système de batterie lithium-ion.
- GKN est un Groupe international qui conçoit et produit une large gamme de composants destinés principalement aux marchés de l'automobile, des véhicules hors route et de l'aéronautique. Sa Division GKN Driveline est le premier fournisseur mondial de composants et systèmes destinés à la chaîne cinématique des véhicules. Elle proposera un réducteur à haut rendement qui accepte un régime d'entrée très élevé.
- Michelin commercialise des pneumatiques à haut contenu technologique pour tous types de véhicules, des cartes routières, des guides et des services numériques. Ce manufacturier est également connu pour l'invention du pneu radial, technologie aujourd'hui reprise par tous les manufacturiers. Michelin fournira les pneus à basse consommation d'énergie, mais apportera également son expertise en liaison au sol et en motorisation dans les roues (projet Active Wheel).
- Leoni est un fournisseur mondial de câbles électriques et systèmes de câblage pour tous types d'applications (construction, aéronautique, communication, etc.). L'industrie automobile constitue son activité principale. Leoni apportera son expertise dans le domaine des câbles et faisceaux de distribution électrique, notamment en transport de courants à très haute tension.

Valeo et ses partenaires sont capables de maîtriser tous les problèmes techniques posés par les véhicules électriques et hybrides rechargeables, ainsi que de proposer toutes les architectures possibles de chaîne de traction.

## **7.2 Les innovations dans la chaîne de traction**

La chaîne de traction de seconde génération proposée par Valeo est le fruit de plusieurs innovations technologiques. Elle marque une étape importante dans le développement de la voiture à zéro émission.

### **7.2.1 La fusion du chargeur et de l'onduleur**

L'onduleur transforme le courant continu en provenance de la batterie et du convertisseur de tension en courant triphasé pour le moteur électrique. Il gère également la puissance électrique selon la consigne donnée par la pédale d'accélérateur et selon des fonctions de commande annexes telles que l'antipatinage, le régulateur de vitesse ou le contrôle de stabilité. De son côté, le chargeur reçoit le courant alternatif par la prise connectée au secteur et le transforme en un courant continu dont la tension est adaptée au pack de batteries. Ces deux systèmes sont généralement indépendants l'un de l'autre, la charge étant effectuée à l'arrêt du véhicule.

Or, ce système de charge est lourd, encombrant et onéreux. Une des innovations Valeo est d'utiliser l'onduleur et une partie du moteur électrique en mode inversé, ces organes étant au repos à ce moment-là. Il n'est ainsi plus nécessaire de disposer d'un système de charge dédié, ce qui génère une économie considérable. Ce nouveau système est à la fois compatible avec les charges lentes et les charges de puissance moyenne de 43 kW et plus. Outre une importante diminution de coût, le système électronique est réduit tant en poids qu'en encombrement. Cette adaptation de l'onduleur est rendue possible grâce à son montage de type « triple pont en H » qui permet des connexions aux points milieux pour le système de charge.

Un autre avantage est dû au fait qu'en cas de défaillance d'une des phases, le système peut encore fonctionner en mode biphasé, ce qui serait impossible avec un moteur standard synchrone.

### **7.2.2 Une tension élevée**

Afin d'optimiser le rendement du moteur dans les bas régimes, un dispositif programmable adapte progressivement la tension entre 410 et 900 volts, la valeur la plus élevée étant atteinte à partir du régime nominal. Cette tension très élevée pour l'alimentation du moteur et de l'onduleur est ensuite constante et totalement indépendante de l'état de charge de la batterie.

Une tension accrue permet d'abaisser l'intensité dans les systèmes. En conséquence, les pertes sont réduites et le rendement de la chaîne de traction est accru jusqu'à 20%. L'énergie économisée prolonge d'autant l'autonomie du véhicule. De plus, le coût du produit est abaissé car la quantité de silicium nécessaire est diminuée. Enfin, le système de charge est facilement adaptable aux différentes tensions d'alimentation rencontrées dans les marchés (ex : 100 V au Japon et 240 V en Europe).

### **7.2.3 Autres innovations**

L'ensemble de la chaîne de traction a été étudié pour accepter un moteur opérant à un régime particulièrement élevé. Ce choix technologique permet de réduire non seulement le coût, mais également l'encombrement et la masse du moteur, ce dernier facteur favorisant l'autonomie ou la réduction de la capacité des batteries, et donc aussi leur coût.

L'électronique de puissance est disposée au plus près des enroulements du moteur, ce qui permet un ensemble plus compact et améliore sa fiabilité. Les pertes électriques inhérentes à la longueur des câbles sont également réduites.

### Plus de 10 000 voitures électriques produites

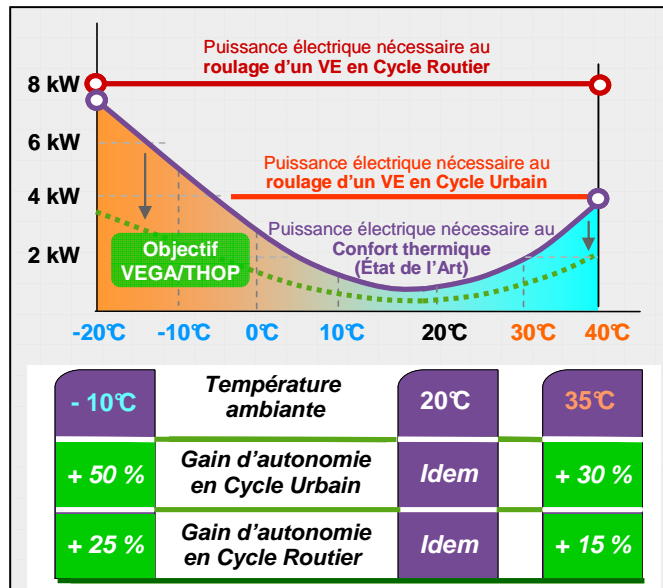
Avec une production de plus de 10.000 véhicules entre 1995 et 2005, Valeo et Leroy Somer sont les plus gros fournisseurs de chaîne de traction électrique au monde. Les Citroën AX, Saxo et Berlingo, Peugeot 106 et Partner ainsi que Renault Kangoo équipées de groupes motopropulseurs électriques développés par Valeo ont parcouru au total plus d'un milliard de kilomètres.

## 7.3 Le projet VEGA/THOP

Le projet VEGA/THOP (\*) a pour objectif de réaliser des véhicules électriques démonstrateurs optimisés au niveau des batteries et de la gestion thermique de l'habitacle grâce à des solutions nouvelles. Ces solutions permettront d'améliorer l'autonomie des véhicules électriques ou hybrides, en particulier pour les températures extérieures extrêmes, non pas en optimisant le rendement des moteurs électriques ou la masse des véhicules, mais en proposant des systèmes thermiques novateurs et en repensant la gestion du confort thermique dans l'habitacle. En effet, les fonctions de chauffage et de climatisation peuvent, dans certaines conditions d'utilisation, abaisser l'autonomie d'un véhicule électrique de plus de 50%. Il s'agit par ailleurs de disposer d'une source flexible de chauffage et de refroidissement pour un meilleur contrôle thermique des batteries.

Le plan a été validé par le comité de pilotage du Fonds démonstrateur de recherche de l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME) ; il consiste à étudier d'ici 2011 des solutions adaptées aux architectures des voitures électriques et de convertir à la propulsion électrique deux Renault Mégane de démonstration.

VEGA/THOP rassemble Valeo, Renault, Saint Gobain, Hutchinson et deux laboratoires : le CETHIL-INSA de Lyon spécialisé dans l'analyse des transferts thermiques et le LINC, Laboratoire d'Imagerie et de Neurosciences Cognitives qui étudiera une nouvelle approche des besoins et attentes en matière de confort thermique à bord d'un véhicule.



(\*) : VEGA/THOP : (Véhicule Electrique à Grande Autonomie / Système de Gestion Thermique Optimisée du Confort Habitacle et de la Chaîne de Traction).

## 7.4 Gestion Thermique Moteur des véhicules Hybrides et Electriques

Avec l'ajout d'un moteur additionnel, le système de refroidissement des véhicules hybrides (parallèle, série ou rechargeable) se complexifie par rapport à celui d'un véhicule classique, c'est-à-dire équipé d'un seul moteur thermique. L'optimisation de son fonctionnement est un facteur clé pour étendre la plage de propulsion électrique de ces véhicules car les composants électriques ont besoin d'une température stabilisée pour travailler au meilleur point de rendement et offrir leur durée de vie optimale.

Avec une architecture de refroidissement standard, le refroidissement du convertisseur DC/DC et du moteur électrique impose l'ajout d'une nouvelle boucle thermique dédiée incluant un radiateur, une pompe à eau, un groupe moto-ventilateur et des vannes. Grâce à son architecture UltimateCooling™, Valeo a développé une approche "plug & play" qui permet de rajouter facilement de nouveaux éléments à refroidir sans modification de l'architecture sous capot.

UltimateCooling™ est basé sur l'utilisation d'un seul fluide caloporteur réparti sur 2 circuits avec des niveaux de température différents. Ceci permet de garantir à chaque composant sa température optimale de fonctionnement pour un débit de fluide caloporteur le plus faible possible: cet ajustement du système de refroidissement au strict nécessaire permet de réduire la consommation électrique et les émissions de CO<sub>2</sub>. Les 2 niveaux de températures sont fournis par un seul radiateur multi-températures permettant également de réduire l'encombrement en face avant du véhicule.

Pour les véhicules hybrides, parallèle ou série, la capacité d'ajouter simplement sur la boucle basse température des composants comme le moteur électrique, le convertisseur DC/DC et le chargeur de batterie au moyen d'un simple vannage rend possible l'utilisation d'une seule et unique architecture de refroidissement pour les véhicules à moteur thermique, hybride ou électrique sans aucune modification.

Durant la recharge de la batterie, le système de refroidissement est complètement opérationnel pour protéger à la fois le chargeur et la batterie. Un groupe moto-ventilateur spécifique, capable de fonctionner à très basse vitesse, a été développé pour augmenter sa durée de vie et réduire le bruit de fonctionnement.

L'architecture UltimateCooling™ a déjà été sélectionnée par deux constructeurs européens pour assurer le refroidissement de leurs futurs véhicules hybrides et électriques.

## **7.5 Les solutions de gestion thermique de la batterie**

La capacité des batteries à emmagasiner et restituer l'énergie, leur durée de vie et leur puissance disponible dépendent fortement de leur gestion thermique. Valeo offre une panoplie de technologies couvrant les besoins des véhicules électriques (BEV et REBEV) et hybrides rechargeables.

### **7.5.1 Le refroidissement à air**

Un ventilateur aspire l'air de l'habitacle et le distribue de façon homogène dans le pack de batteries via des canalisations. Pour accroître le refroidissement, il est également possible de récupérer de l'air froid d'un évaporateur dédié du système de climatisation. Outre le refroidissement, le circuit d'air permet d'évacuer à l'extérieur les gaz toxiques ou inflammables émis par les batteries.

Le ventilateur est entraîné par un moteur sans balais à haut rendement et son débit varie avec le contrôle de la tension. La technologie sans balais évite tout risque d'étincelle près des batteries. Par temps chaud, le ventilateur peut également assurer une fonction de pré-ventilation afin de réduire la température de l'habitacle avant le démarrage du véhicule, ceci en consommant un courant minimal.

### **7.5.2 Le refroidissement liquide**

Un refroidissement du pack de batteries peut également être assuré par un circuit de climatisation. Les cellules des batteries sont alors contrôlées thermiquement par un circuit d'eau glycolé refroidi par la boucle froide disponible sur le véhicule. Ce circuit passe par un échangeur eau/réfrigérant connecté en parallèle à l'évaporateur sur le circuit primaire du réfrigérant.

En conditions hivernales, il n'est pas nécessaire d'avoir recours à la climatisation pour refroidir les batteries. Le circuit est alors dévié vers un tube aileté placé sous le châssis qui dissipe directement la chaleur dans l'air extérieur.

### **7.5.3 Le refroidissement direct**

Valeo propose aussi un système de refroidissement encore plus novateur. Un évaporateur intégré au module de batteries est connecté en parallèle au circuit de climatisation conventionnel du véhicule. Cet évaporateur est constitué de tubes en aluminium en forme de serpent, mis en contact avec les cellules du pack batteries. Cette construction permet un échange thermique direct avec les cellules ainsi qu'un équilibre parfait des températures à l'intérieur du pack.

### **7.5.4 Le refroidissement par thermoélectricité**

Le refroidissement des cellules des batteries est effectué dans ce cas par un module contenant des cellules Peltier constitué de deux faces, une froide et l'autre chaude. La différence de température est

contrôlée par la tension appliquée aux cellules. En exploitant la face froide ou la face chaude, il est possible de refroidir ou de réchauffer les batteries.

Ce système présente l'avantage d'être totalement autonome du véhicule, à l'exception de la connexion électrique. Il est notamment bien adapté au concept du remplacement automatisé des batteries.

## **7.6 L'éclairage faible consommation**

L'éclairage diurne, qui est déjà en vigueur dans les pays scandinaves et au Canada, sera également obligatoire en Europe pour tous les véhicules légers à partir de 2011 ; c'est un élément de sécurité active qui permet de repérer plus tôt et plus distinctement les autres véhicules. L'emploi des feux diurnes étant permanent, contrairement aux fonctions d'éclairage nocturne, une minimisation de leur consommation est prioritaire pour limiter leur impact sur l'autonomie des voitures électriques. Valeo a mis au point une fonction dédiée utilisant des diodes électro-luminescentes (LED – Light Emitting Diode). La consommation électrique totale de cette fonction passe ainsi de 38 Watts avec des ampoules halogènes à seulement 10 W. Par ailleurs, l'éclairage diurne à LEDs ne demande aucun entretien durant toute la vie d'une voiture et il est donc parfaitement adapté à un usage intensif.

Les feux de croisement, qui consomment 125 W avec des ampoules halogènes H4, verront leur consommation abaissée à 40 W avec l'emploi de LED, tout en offrant une quantité de lumière équivalente. De nouveaux développements permettront également de réduire cette puissance consommée à seulement 30 W à partir de 2015. La aussi la durée de vie des LED est égale à celle de la voiture, soit 4 fois plus longue que des ampoules halogènes H4. Leur lumière plus blanche apporte un confort visuel supérieur car elle est plus proche de celle du jour. À l'avenir, il sera également possible d'abaisser momentanément l'intensité de l'éclairage des LED dans certains cas d'utilisation comme la conduite à très basse vitesse dans un trafic surchargé, ce qui réduira encore la consommation – une option qui est irréalisable avec les ampoules halogènes car leur lumière devient rougeâtre lorsque leur tension d'alimentation est réduite.

La consommation électrique totale de l'éclairage de nuit, pondérée par le taux d'utilisation de chaque fonction (0% feux de jour, 5% clignotants, 100% feux de position, 30% stop, 80% feux de croisement et 20% feux de route), est en moyenne de 206 W avec des ampoules conventionnelles. Si toutes ces fonctions passent en technologie LED, leur consommation moyenne sera de 41 W seulement.

## 8 Les offres véhicules

La propulsion électrique est capable de répondre aux besoins d'une large gamme de moyens de transport : vélos, tricycles, motos, petites voitures à prestations limitées, voitures à prestations conventionnelles ou sportives, camionnettes, camions et bus, voire même des avions.

Les tableaux ci-dessous sont une liste des voitures électriques capables d'atteindre au moins 100 km/h. Les modèles sont classés selon leur date de commercialisation annoncée (avec parfois un volume initial de production limité).

### 8.1 Les voitures électriques BEV

Marque et modèle	Longueur x Largeur (m)	Nombre de places	Batteries	Moteur	Autonomie	Performances	Date de lancement estimée
Fiat Fiorino Micro-Vett	3,96 x 1,72	5 places	Lithium-ion	30 kW	100 km en cycle urbain	100 km/h 0-50 km/h 7 s.	Disponible
Fiat Doblo Combi Micro-Vett	4,25 x 1,72	5 places	Lithium-ion	30 kW	70 à 156 km	100 à 120 km/h	Disponible
Phoenix Motorcars SUT	4,97 x 1,90	4 places	Lithium-titane	98 kW	160 km	150 km/h	Disponible
Venturi Fetish	2,89 x 1,88	2 places	Lithium-ion	180 kW	250 km	160 km/h 0-100 km/h moins de 5 s.	Disponible
Mitsubishi i-Miev	3,40 x 1,48	4 places	Lithium-ion	47 kW	160 km (1)	130 km/h	Disponible au Japon
TH!NK city	3,12 x 1,60	2 places	Lithium-ion ou sodium	30 kW	180 km	100 km/h 0-80 km/h 16.0 s.	Disponible
Mini E	3,70 x 1,68	2 places	Lithium-ion	150 kW	167 km cycle combiné	152 km/h 0-100 km 8,5 s.	Disponible
Tesla Motors Roadster	3,95 x 1,87	2 places	Lithium-ion	185 kW Version 212 kW	393 km	200 km/h	Disponible
Subaru Stella	3,40 x 1,48	4 places	Lithium-ion	47 kW	80 km	100 km/h	Disponible au Japon
Toyota iQ (FT-EV)	2,99 x 1,68	3 places (+1)	Lithium-ion	45 kW	80 km	110 km/h	Disponible au Japon
Smart Electric	2,69 / 1,56	2 places	Lithium-ion	30 kW	115 km	100 km/h 0-60 km/h 5,7 s.	fin 2009
Heuliez Friendly	2,90 x 1,55	3 places (+ 1)	Lithium Phosphate de Fer	10 kW	100 à 250 km selon batteries	110 km/h 0-50 km/h en 7 s.	2010
Mercedes-Benz Concept BlueZERO E-CELL	4,22 x 1,78	5 places	Lithium-ion	70 kW	200 km	150 km/h, 0-100 km/h en moins de 11 s.	2010
Nissan Leaf	4,45 x 1,77	5 places	Lithium-ion	80 kW	160 km	140 km/h	2010
Bolloré Bluecar	3,65 x 1,72	4 places	Lithium métal polymère	50 kW	250 km	130 km/h 0-100 km/h 10 s.	fin 2010

(1) : cycle 10-15 Japon, (2) : norme FUDS, (3) : norme FTP 72

Marque et modèle	Longueur x Largeur (m)	Nombre de places	Batteries	Moteur	Autonomie	Performances	Date de lancement estimée
Heuliez Will	3,70 x 1,70	5 places	Lithium-ion		100 à 400 km selon batteries		Fin 2010
Dodge Circuit EV	3,90 x 1,71	2 places	Lithium-ion	200 kW	240 à 320 km	193 km/h 0-100 km/h 5 s	fin 2010
Renault Kangoo Be Bop Z.E.	3,87 x 1,83	5 places	Lithium-ion	44 kW	160 km	130 km/h	2011
BYD e6	4,55 x 1,82	5 places	Lithium Phosphate de Fer	75 à 200 kW	400 km	160 km/h	2011 aux Etats-Unis
Volkswagen Up! Electric	3,45 x 1,63	4 places	Lithium-ion	45 kW	105 km		?

## 8.2 Les voitures avec prolongateur d'autonomie REBEV

Marque et modèle	Longueur x Largeur (m)	Nombre de places	Batteries	Moteur électrique	Autonomie	Performances	Date de lancement
Fisker Karma	4,99 x 1,98	4 places	Lithium-ion	300 kW (2 moteurs)	80 km élect.	200 km/h 0-100 km/h 5,8 s.	2010
Chevrolet Volt (2)	4,40 x 1,80	4 places	Lithium-ion	111 kW	60 km élect. Plus de 500 km thermique+élect. (1)	161 km/h 0-100 km/h en 9 s.	fin 2010
Volvo ReCharge Concept	4,25 x 1,78	4 places	Lithium-polymère	Dans les 4 roues	100 km élect.	160 km/h 0-100 km/h en 9 s.	2011 ?
Mercedes BlueZERO E-CELL PLUS	4,22 x 1,78	5 places	Lithium-ion	70 kW 100 kW en crête	50 km élect. 600 km thermique+élect.	150 km/h 0-100 km/h en moins de 11 s.	NC
Chrysler 200C EV	4,88 x 1,87	4 places	Lithium-ion	200 kW	64 km élect. 644 km thermique+élect	193 km/h 0-100 km/h 7 s.	NC

(1) : selon cycle interne GM, NC : non communiqué, (2) : également Opel Ampera et Cadillac Converj avec des systèmes de traction et de recharge semblables

## 8.3 Les voitures hybrides rechargeables PHEV

Peu de voitures hybrides rechargeables ont été officiellement annoncées. Actuellement, Toyota teste différentes configurations « plug-in » de la Prius, notamment en ce qui concerne l'autonomie (type et capacité de batteries). Potentiellement, tous les véhicules hybrides sont convertibles en version rechargeable. Les principaux constructeurs américains se sont déjà dits intéressés par ce concept, de même que le Groupe Volkswagen qui développe un modèle sur la base de la Golf. Leur autonomie en mode électrique sera proche de celle des voitures électriques REBEV.

## 9 Conclusion

L'ouverture des grands centres urbains aux seuls véhicules ZEV en 2025 répond à de nombreuses problématiques auxquelles la société doit faire face dès aujourd'hui. La maturité technique et les perspectives d'évolution des véhicules électriques et hybrides rechargeables rendent cet objectif réalisable. Cependant, avant qu'un parc conséquent de ZEV soit créé, un grand nombre de barrières devront être surmontées.

Comme nous l'avons démontré, le challenge du développement du marché de la voiture électrique ou hybride rechargeable est principalement économique. Son développement technique est nécessaire afin d'offrir un produit dont le coût total de possession devienne équivalent à celui du véhicule thermique sans aide à l'achat. Le développement rapide de ce marché passe par les étapes suivantes :

A partir de 2010-2011 une première génération de véhicules principalement destinée à des flottes d'entreprises et d'administration, aux transports publics, taxis, ainsi qu' à des systèmes de location et d'auto-partage devrait être mise sur le marché. L'investissement pour l'infrastructure nécessaire serait limité. Cette première étape devrait permettre de susciter la demande du grand public.

A partir de 2014-2015 une deuxième génération de véhicules, soit électriques soit hybrides rechargeables, destinés aux particuliers serait commercialisée. Son succès serait, entre autres, conditionné par sa compétitivité par rapport au véhicule thermique et le déploiement d'une infrastructure plus dense comprenant des bornes de recharge lente sur les lieux d'habitation et de travail, des bornes de recharges rapides et des stations d'échange de batteries.

Le développement simultané de deux générations de véhicules est rendu nécessaire car les états ne pourront pas supporter la charge des aides à l'achat lorsque le marché aura décollé et aussi parce qu'une dizaine d'années est nécessaire pour constituer un parc suffisant pour bannir des centres villes les véhicules polluants.

Face à l'avance technologique acquise par les Japonais et la volonté affichée des Américains et des Chinois, l'industrie européenne se doit de réagir rapidement.

### **« N'autoriser dans les grands centres urbains que les véhicules ZEV dès 2025 »**

Cet objectif est à notre portée, sa réalisation nécessitera que tous les acteurs se mobilisent afin de surmonter les barrières encore existantes, et seule une volonté politique forte permettra de le réaliser dans les temps.