



La voiture de demain : ↗ carburants et électricité

2011

Jean Syrota
président

Philippe Hirtzman, CGIET
Dominique Auverlot, CAS
coordinateurs

Avec la participation de la DGCIS,
Direction générale de la compétitivité, de l'industrie et des services,
ministère de l'Économie, des Finances et de l'Industrie

Rapporteurs

Étienne Beeker, CAS

Alan Bryden, CGIET

Johanne Buba, CAS

Caroline Le Moign, CAS

Felix von Pechmann, MINES ParisTech

avec le concours de **Gaëlle Hossié**, CAS

Avertissement

Ce rapport a pour objet d'étudier, pour la vingtaine d'années à venir, les perspectives de développement des véhicules grand public à motorisation électrique – véhicule électrique, véhicule hybride rechargeable ou non – avec une attention particulière pour les données technico-économiques relatives aux batteries. Il examine également les conditions dans lesquelles pourraient se développer les différents types de véhicules, en prenant comme référence les évolutions probables du véhicule thermique. Ces évolutions ont été présentées dans le rapport du Centre d'analyse stratégique (2008), *Perspectives concernant le véhicule « grand public » d'ici 2030*, disponible sur le site Internet du Centre.

Avant-propos



Vincent Chriqui,
directeur général
du Centre d'analyse
stratégique

Le système automobile tel qu'il s'est bâti au fil du XX^e siècle n'est plus soutenable. La raréfaction des ressources pétrolières, la réduction nécessaire des émissions de gaz à effet de serre, la congestion de nos métropoles, tout incite à le repenser, d'autant que le parc automobile mondial ne cesse de s'étendre, alimenté par la forte croissance des pays émergents.

Une première approche consiste à revoir l'usage que nous faisons de la voiture, en développant l'auto-partage et le covoiturage, en promouvant partout où c'est possible les transports en commun ou le vélo. Ces « nouvelles mobilités » ont fait l'objet d'un récent rapport du Centre d'analyse stratégique¹. Une seconde approche pourrait imposer une rupture plus radicale : l'abandon du moteur thermique, grand consommateur de pétrole, au profit du moteur électrique. Le groupe de travail présidé par Jean Syrota avait pour mission d'étudier les probabilités d'une telle révolution, alors que la plupart des constructeurs automobiles se sont lancés dans une course à l'innovation dans ce domaine.

Les obstacles ne manquent pas. Il y a tout d'abord le prix, les modèles de véhicules électriques étant aujourd'hui encore relativement coûteux par rapport à leurs équivalents thermiques. Surtout, l'autonomie demeure leur talon d'Achille, avec en particulier la contrainte de recharges fréquentes. À l'heure actuelle,

[1] Centre d'analyse stratégique [2010], *Les nouvelles mobilités. Adapter l'automobile aux modes de vie de demain*, rapport de la mission présidée par Olivier Paul-Dubois-Taine, Paris, La Documentation française.

LA VOITURE DE DEMAIN : CARBURANTS ET ÉLECTRICITÉ

Il n'existe pas sur le marché de batterie à la fois peu onéreuse, fiable sur le plan technique, disposant d'une grande autonomie et d'une longue durée de vie. Les laboratoires y travaillent activement et un certain nombre de pistes paraissent prometteuses à terme, notamment les batteries lithium-air. L'usage des véhicules électriques pourrait ainsi se développer progressivement, d'abord dans des marchés spécialisés – flottes d'entreprises, véhicules de transport en commun ou services postiers, par exemple –, puis plus largement, au fur et à mesure que les innovations technologiques le permettront.

Ces véhicules auront l'immense mérite de contribuer à réduire la pollution dans nos métropoles. Cependant, comme le souligne le rapport, on ne peut pas à proprement parler de véhicules « zéro émission ». Une voiture électrique ne pollue pas lorsqu'elle roule, mais le bilan environnemental global doit prendre en compte la production de l'électricité consommée (ainsi que celle utilisée pour la fabrication de la batterie) et dépend donc du mode de production électrique de chaque pays.

Quant au véhicule thermique, il n'a certainement pas épuisé ses marges d'amélioration. Dans les années 1950, une grosse voiture américaine ingurgitait 30 litres d'essence sur 100 km, une Citroën DS dans les années 1970 buvait encore 12 litres sur la même distance, nos berlines modernes se contentent de 6 litres... Le moteur thermique devrait encore voir son efficacité énergétique quasiment doubler d'ici à 2030. Le *downsizing*, l'injection directe, la commande électromagnétique des soupapes pourraient diviser par deux les émissions de CO₂. Ces voies d'amélioration joueront un rôle crucial à court-moyen terme : selon les constructeurs, la voiture à moteur thermique représentera encore près de 90 % des ventes en 2020.

On devrait donc assister à une électrification progressive du véhicule thermique. Les systèmes « *stop & start* » coupent le moteur lorsque la voiture est à l'arrêt et le redémarrent ensuite (ou, dans une version améliorée, le coupent sous le seuil des 10-20 kilomètres/heure) : dans les zones congestionnées, ces systèmes réduiraient les consommations de 20 % à 25 %. Les véhicules hybrides, qui associent un moteur thermique et un moteur électrique (celui-ci fonctionnant à faible vitesse), sont également appelés à se développer, dans un premier temps sur le marché haut de gamme.

Les pouvoirs publics peuvent accélérer la transition de plusieurs manières. Il est évidemment souhaitable d'investir dans la recherche de long terme, notamment sur les batteries lithium-air. Par le jeu des incitations et des réglementations

(à l'achat ou à l'usage) il est également possible de favoriser les véhicules tout électriques mais aussi les hybrides. Enfin, la puissance publique est seule à même d'instaurer les normes et les réglementations qui encadreront le développement des infrastructures nécessaires aux véhicules électriques de demain (normes des prises et bornes de recharge).

La grosse berline routière et électrique ne sera peut-être pas pour demain. En revanche, notre environnement urbain pourrait rapidement accueillir des véhicules électriques légers, à deux, trois ou quatre roues, qui feront évoluer notre conception des déplacements. Les Chinois ont ainsi mis en circulation plus de 120 millions de vélos électriques en quelques années... Il est clair que les formes de mobilité sont appelées à changer profondément, en France et dans le monde, au cours des années à venir : ce rapport n'a d'autre but que de contribuer à préparer, et accompagner, cette évolution.

Sommaire



Les grandes orientations	13
Les préconisations	25
Quelques définitions en préambule	31
Introduction	
Pourquoi parle-t-on à nouveau du véhicule électrique ?	35
Chapitre 1	
Recherche batterie sûre, peu chère, avec grande autonomie et longue durée de vie	51
1 ■ Un historique de l'évolution des batteries et de leurs applications au véhicule électrique	52
1.1. Les accumulateurs au plomb ont marqué les débuts des véhicules électriques à la fin du XIX ^e siècle	52
1.2. Au début du XX ^e siècle, les batteries nickel-fer sont à l'origine d'une deuxième génération de véhicules électriques	58
1.3. Apparues au début du XX ^e siècle, les batteries nickel-cadmium ne sont vraiment utilisées pour les véhicules électriques que dans les années 1990	58
1.4. Les batteries nickel-hydride métallique constituent désormais le standard des véhicules hybrides	60
1.5. D'autres batteries ont été étudiées mais n'ont pas réussi à trouver leur application dans le domaine du transport	62
1.6. Les accumulateurs classiques n'offrent qu'une autonomie de quelques dizaines de kilomètres	65
2 ■ Les batteries au lithium : une technologie porteuse de progrès	66
2.1. Certaines batteries au lithium présentent un risque d'incendie	67
2.2. Plusieurs technologies sont en concurrence	70
2.3. Les batteries de demain	76
3 ■ S'agissant des matières premières, les contraintes tiennent plus à la géopolitique qu'à l'état des ressources	87
3.1. Approvisionnement en lithium : des tensions possibles à court-moyen terme, le temps que l'offre s'adapte à la demande	87
3.2. Inquiétudes concernant d'autres matériaux ou métaux	91
3.3. Le monopole chinois sur la fourniture des terres rares	92

4 ■ Le recyclage des batteries lithium-ion est techniquement possible mais non rentable actuellement	94
4.1. Les techniques de recyclage des batteries lithium-ion : entre voie thermique et voie chimique	94
4.2. Les principaux déterminants de la rentabilité économique	96
5 ■ La compétition industrielle est dominée par les pays asiatiques	98
5.1. Le marché actuel des accumulateurs est dominé par les pays asiatiques	99
5.2. Les batteries du futur donnent lieu à de vastes programmes de recherche, notamment au Japon	101
5.3. Aux États-Unis, les programmes de recherche s'accompagnent d'aides financières à l'industrie	101
Conclusion : la nécessité d'un saut technologique	102
Chapitre 2	
Les performances actuelles des véhicules électriques	109
1. ■ Autonomie	109
1.1. Les cycles normalisés existants ne reflètent pas de façon adéquate les consommations et l'autonomie des véhicules électriques	109
1.2. Impact de la vitesse et de la pente sur la consommation d'un véhicule électrique	117
1.3. L'autonomie du véhicule électrique dépend de l'utilisation des auxiliaires, spécialement du chauffage et de la climatisation	122
1.4. L'autonomie réelle des véhicules électriques dépendra beaucoup de l'usage qu'en feront les utilisateurs	125
1.5. Des systèmes performants d'information des conducteurs sont en cours de développement	128
2 ■ Puissance, accélération, vitesse, réduction de la pollution et du bruit	130
2.1. Les moteurs électriques permettent une accélération très linéaire et puissante grâce à un couple élevé disponible immédiatement	130
2.2. Les véhicules électriques pourraient réduire les niveaux de pollution dans les zones urbaines	132
2.3. Le bruit	135
Chapitre 3	
Le véhicule électrique est-il plus économique que le thermique ?	143
1 ■ Le prix d'achat et les coûts d'utilisation restent un facteur déterminant de succès pour un modèle	143

2 ■ Prix des batteries, kilométrage annuel, prix de l'énergie et taux d'actualisation sont les paramètres déterminants	144
3 ■ Les coûts de revient kilométriques du VE et du VTh ne sont comparables qu'à une double condition	149
4 ■ La compétitivité du VE se dégrade rapidement si l'on s'écarte des hypothèses de référence	151
5 ■ La Renault Fluence ZE a un coût comparable à son équivalent diesel grâce au super bonus de 5 000 euros et à condition de parcourir plus de 15 000 km/an	159
6 ■ À son prix actuel, malgré le super bonus, la Peugeot iOn ne semble pas en mesure de concurrencer ses équivalents thermiques	164
7 ■ Économie des véhicules hybrides et hybrides rechargeables	169
8 ■ Les émissions de CO₂ du véhicule électrique résultent du contenu en carbone de l'électricité qu'il consomme et des batteries qu'il utilise	175
9 ■ L'exemple du projet Autolib'	181
Chapitre 4	
Réglementation, normes et standards pour le déploiement du véhicule électrique	187
1 ■ Un déploiement à grande échelle suppose une action volontariste en matière de réglementation et de normalisation	187
2 ■ L'imbrication entre la réglementation, la normalisation et les standards	189
2.1. La référence aux normes dans les réglementations	190
2.2. Un contexte réglementaire qui doit être adapté pour le véhicule électrique	191
3 ■ Normes et standards	200
3.1. La normalisation européenne et internationale est encore largement en chantier	200
3.2. Des divergences et une pluralité de solutions pour les prises, les connecteurs et les câbles	202
3.3. Des normes d'essais et de performances à compléter pour évaluer la sécurité et les performances des batteries	206
3.4. Des travaux à accélérer pour définir et harmoniser les protocoles et modalités de communication	209

3.5. Des mandats européens de normalisation qui sont vitaux pour ouvrir un marché domestique significatif à l'industrie européenne	211
3.6. Une position française en principe forte dans la normalisation européenne et internationale mais pénalisée par les divergences stratégiques des constructeurs nationaux	212
3.7. Des standards qui sous-tendent des modèles alternatifs de déploiement du véhicule électrique	212
4 ■ Recommandations	214
 Chapitre 5	
Demande et marché potentiel des véhicules électriques	217
1 ■ Entre croissance forte dans les pays émergents et saturation de la demande dans les pays développés	218
1.1. La crise économique souligne le caractère atone du marché automobile dans les pays développés	218
1.2. Les pays émergents sont porteurs d'une forte demande, pas nécessairement écologique	220
1.3. La transformation des comportements des consommateurs est contrastée	222
2 ■ Les contraintes qui risquent de peser sur les consommateurs	225
2.1. Le prix demeure le principal facteur d'achat	226
2.2. Les contraintes propres aux nouvelles motorisations façonnieront leur utilisation	227
3 ■ Comment sortir de la consommation de niche ?	229
3.1. Une ouverture à la prestation de services ?	229
3.2. Une ouverture à la demande de deux-roues électriques ?	231
3.3. Cibler le consommateur potentiel	232
Annexes	237
Annexe 1 : Les batteries au lithium	239
Annexe 2 : Le moteur thermique à essence ou diesel, en constante évolution, a encore un bel avenir devant lui	273
Annexe 3 : Les perspectives de progrès communs à tous types de véhicules	285
Annexe 4 : Synthèse d'une mission effectuée en Chine et au Japon en novembre 2010	315
Annexe 5 : Liste des personnes auditionnées	323

Les grandes orientations

1 ■ Un environnement international, politique et sociologique en forte évolution

Le contexte international se caractérise par la perspective d'une forte croissance des parcs automobiles des pays émergents, en premier lieu la Chine et l'Inde. Il est également marqué par les annonces de plusieurs constructeurs mondiaux concernant la mise sur le marché de véhicules électriques. Trois grands pays asiatiques occupent d'ores et déjà des positions fortes dans le domaine des batteries : depuis une quinzaine d'années, grâce à l'avance prise avec les ordinateurs et les téléphones portables, le Japon, la Corée du Sud et la Chine ont réussi à concentrer l'essentiel de la production mondiale des batteries, notamment celles à base de lithium, considérées actuellement comme la voie d'avenir à moyen terme en matière de stockage d'énergie électrique embarquée.

Les intentions politiques en faveur des véhicules « décarbonés » (tout électriques et hybrides rechargeables) se sont intensifiées. Dans un contexte de mise en tension collective permanente par le défi climatique (rapports du GIEC¹ et de l'OCDE, plans et directives de la Communauté européenne, conférences de Copenhague et de Cancun) et par la hausse du prix du pétrole perçue comme durable, des mesures sont prises dans différents pays en faveur des énergies nouvelles, des véhicules « décarbonés » et de nouveaux projets de mobilité.

Le contexte sociologique a évolué et peut être source de surprises. L'opinion publique des pays industrialisés – en particulier la France –, sans doute désorientée par une communication publique foisonnante et par une multitude d'initiatives industrielles peu coordonnées (variété des stratégies industrielles, normalisation en cours d'élaboration, etc.), semble s'accoutumer à l'idée que les habitudes de mobilité vont changer. Le mode de possession d'un véhicule est remis en cause et le modèle social qui l'accompagne semble atteindre

[1] GIEC : Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat.

ses limites (encombrements de circulation, pollution urbaine, peut-être prix des carburants). Dans ce contexte, des sondages réalisés depuis deux ans font apparaître que les trois quarts des Français se déclarent prêts à acquérir un véhicule électrique, sous réserve qu'il ne coûte pas plus cher qu'un véhicule conventionnel équivalent et que le handicap de l'autonomie soit réduit. En revanche, en dehors des configurations urbaines spécifiques (qui concentrent quand même près de la moitié du parc automobile), la voiture particulière représente un « accessoire de vie » incontournable, synonyme de mobilité personnelle et de liberté, voire d'outil de travail indispensable.

2 ■ Quelle motivation peut pousser le consommateur à opter pour un véhicule électrique ?

En France comme à l'étranger, l'année 2010 a vu se multiplier les déclarations des constructeurs industriels sur les véhicules tout électriques, sans que soient précisés ni la nature de ces véhicules (prototype, expérimentation, présérie, test de partenariat, production de niche) ni le calendrier ni enfin le volume de commercialisation.

Face à une information incomplète et parfois trompeuse, sur le plan aussi bien technique que commercial, le consommateur se manifeste de façon assez sympathique mais finalement peu ferme : les déclarations d'intention, certes largement favorables, n'engagent guère les personnes sondées, qui réagissent plus à une dynamique collective qu'à une volonté personnelle de passer à l'acte.

L'offre industrielle en France est affichée mais reste – début 2011 et sans doute pour de nombreux mois encore – concrètement inaccessible : Renault investit et communique massivement, avec l'objectif d'une offre en 2011 tant pour la France que pour d'autres pays (mise en place par Better Place d'un réseau comportant des installations d'échange de batteries en Israël et au Danemark). Le groupe PSA s'est lancé le premier, de façon inattendue, en élargissant son partenariat avec un constructeur japonais (Mitsubishi). La concrétisation des projets franco-italiens du groupe Bolloré, sans cesse repoussée, a pour prochaine échéance le projet « Autolib » (démarrage annoncé pour l'automne 2011 avec, en rythme de croisière, 3 000 véhicules). Les autres initiatives (Heuliez, Aixam, etc.) ou réalisations (Nissan avec la Leaf, Tesla, dans un registre commercial « haut de gamme ») ont, pour l'instant, un poids marginal. Il en est de même des tests et essais en cours ou prévus en 2011 et 2012 (BMW/Mini

électrique, Daimler/Smart électrique, Blue On électrique de Hyundai, Toyota hybride rechargeable, etc.).

2.1. Les qualités intrinsèques des véhicules tout électriques profitent à la collectivité

La propulsion par l'électricité n'engendre pas, au niveau du véhicule, de polluants toxiques ou désagréables comme les oxydes d'azote (NO_x), les particules et les hydrocarbures imbrûlés. C'est un avantage appréciable dans les centres-villes encombrés.

La voiture électrique n'émet pas de CO_2 à l'usage. Ces caractéristiques ont conduit à populariser le véhicule tout électrique comme véhicule « écologique », « décarboné » ou « zéro émission ». C'est une communication réussie mais pour le moins surprenante : personne n'a eu l'idée de donner au chauffage électrique l'image vertueuse de « chauffage zéro émission ». Il faut savoir que la production thermique d'électricité la plus répandue dans le monde repose sur le charbon, le gaz, le lignite, des produits pétroliers et qu'elle engendre des émissions de CO_2 , d'oxyde d'azote et de particules. Il est donc abusif de considérer *systématiquement* les véhicules électriques comme une façon de lutter contre le réchauffement climatique.

Le bruit est réduit. À vitesse faible ou lors des démarrages et accélérations, le moteur du véhicule électrique émet moins de bruit que le moteur thermique, surtout quand celui-ci est diesel. En ville, le progrès est donc très appréciable. À vitesse plus élevée, l'avantage est moindre car les bruits du roulement et du vent sont prépondérants.

Le véhicule électrique, n'utilisant pas de carburant, permet de diminuer la consommation de pétrole (tout en augmentant la consommation d'énergie primaire). Cet objectif peut, comme pour les émissions de CO_2 , être aussi partiellement atteint par une diminution de la consommation spécifique des véhicules thermiques ou par l'utilisation d'agrocarburants. Pour les pays en quête d'indépendance pétrolière, à l'instar d'Israël ou de la Chine, le VE peut cependant apparaître comme la priorité.

2.2. Les insuffisances des véhicules tout électriques affectent les utilisateurs

La vitesse de pointe, largement suffisante pour rouler en ville et sur route, est le plus souvent très inférieure à celle des véhicules thermiques comparables.

LA VOITURE DE DEMAIN : CARBURANTS ET ÉLECTRICITÉ

Le volume du coffre est plus petit que celui du véhicule thermique comparable, en raison du volume des batteries placées pour l'instant sous le plancher (rehaussé en conséquence), voire dans le coffre ; une conception nouvelle du véhicule électrique permettra vraisemblablement de porter remède à cet inconvénient.

Le vieillissement et la durée de vie des batteries sont insuffisamment connus. On peut donc penser que les batteries seront de préférence louées, car il est peu probable qu'un propriétaire puisse supporter le coût du changement de ses batteries en cas de défaillance, alors qu'elles représentent près de la moitié du prix du véhicule tout électrique. Achètera-t-il alors un véhicule sans batterie ? Vraisemblablement, il louera sur longue durée la totalité du véhicule tout électrique.

La sécurité des batteries, du moins pour certains types de modèles au lithium, n'est pas encore totalement assurée (les retours d'image après des accidents en période de lancement commercial pourraient se révéler catastrophiques). La mise en œuvre des certifications en matière de sécurité (type INERIS) apparaîtra vite incontournable, tant pour les véhicules hybrides rechargeables que pour les véhicules tout électriques.

La durée de recharge standard (entre 5 et 8 heures sur une alimentation à 220 volts, le double en 110 volts) impose une contrainte nouvelle concernant à la fois la gestion du temps d'usage, le mode d'approvisionnement électrique (il faut trouver un emplacement avec une prise sécurisée) et la disponibilité immédiate du véhicule. Cette contrainte peut être partiellement compensée par l'accès à des points de recharge accélérée ou rapide, qui restent toutefois à mettre en place dans les lieux publics et dont l'usage doit rester exceptionnel, tant en raison des incertitudes sur l'impact de leur usage répété sur la durée de vie des batteries que pour privilégier les recharges en périodes creuses. La recharge sera fréquente, si ce n'est quotidienne. Elle oblige à manipuler un long cordon, qui traîne sur le sol et salit donc le coffre et les mains de l'opérateur.

L'autonomie limitée est le handicap le plus lourd du véhicule tout électrique. La consommation est très difficile à prévoir car elle dépend du mode de conduite, de la vitesse, de la pente de la route, du vent, de la température extérieure (pour le chauffage et la climatisation) et de l'utilisation des accessoires (éclairage, essuie-glaces, radio, etc.). Les constructeurs affichent une autonomie souvent proche de 150 km, calculée à partir des tests normalisés de consommation, mais en pratique elle est plutôt de l'ordre

de 80 km. Cela revient à circuler en permanence dans un véhicule thermique dont le réservoir n'aurait qu'une capacité de 5 à 8 litres de carburant, soit la quantité qui reste quand la jauge signale l'urgence d'un passage à la pompe !

2.3. Rien ne permet aujourd’hui de prévoir que la voiture tout électrique sera moins chère que la voiture thermique

Pour surmonter ces difficultés, la voiture tout électrique devrait être moins chère que la voiture thermique comparable. Or les données économiques (hors aides publiques) sont en défaveur du véhicule électrique par rapport au véhicule conventionnel équivalent, même si l'on prend en compte les effets d'échelle en cas de succès. Les calculs de coût global du kilomètre parcouru supposent la connaissance de différents paramètres encore entachés d'incertitude, d'autant que le marché de l'occasion des véhicules électriques et des batteries n'existe pas encore. Les paramètres les plus importants sont le prix d'achat ou de location, le prix de l'énergie (sachant que le prix de l'électricité connaît dans la plupart des pays des fluctuations parallèles à celles du pétrole), la taxation de l'énergie (en France, on compare le prix du carburant fortement taxé au prix de l'électricité peu taxée), la consommation future des véhicules thermiques et, surtout, le nombre de kilomètres parcourus (il est difficile d'affirmer que le véhicule tout électrique est fait pour les petits trajets urbains tout en considérant qu'il parcourt 15 000 km ou davantage par an).

Dans la plupart des cas, le véhicule tout électrique sans batterie n'est pas moins cher que son équivalent thermique et le surcoût des batteries, achetées ou louées, est très difficilement compensé par les coûts de fonctionnement moins élevés, même en tenant compte de l'aide actuelle de 5 000 euros en France (plafonnée à 20 % du prix du véhicule, batterie comprise). Avec les offres commerciales affichées début 2011, le coût de revient kilométrique d'un véhicule électrique apparaît entre 20 % et 100 % plus élevé que celui d'un véhicule conventionnel à usage équivalent, ce chiffre dépendant énormément du nombre de kilomètres parcourus à l'année.

Les effets d'échelle d'une production croissante de véhicules électriques (hors batterie) devraient engendrer une baisse des coûts, en particulier dans la fabrication des moteurs électriques, si toutefois le renchérissement attendu de certaines matières premières (notamment cuivre et métaux non ferreux issus des terres rares) ne venait pas la contrebalancer. La production en série des batteries devrait également faire baisser leur coût unitaire, le prix de

300 euros/kWh étant, pour de nombreux experts, un seuil difficile à franchir, en raison du prix des composants de base. Les constructeurs auraient alors un choix à faire : réduire le handicap de prix ou bien réduire le handicap du manque d'autonomie.

2.4. Les modalités d'implantation des installations fixes de charge, tant publiques que privées, restent incertaines

Pour la recharge à domicile, les prises de courant domestiques actuelles à 220 volts n'offrent pas toujours des garanties de sécurité suffisantes pour délivrer de façon répétée leur puissance maximale autorisée de 3 kWh pendant plus de deux heures. Des incertitudes subsistent sur le courant qu'elles pourraient supporter sur de longues périodes répétées. La limitation du courant maximum admissible à 13, 10 voire 8 ampères, qui reste d'ailleurs à préciser, augmentera proportionnellement la durée de charge. C'est pourquoi la recharge à domicile devra privilégier l'utilisation, et donc l'installation, de prises dédiées et sécurisées et comporter, en tout état de cause, un contrôle de la sécurité de l'installation électrique en vue de son utilisation pour la recharge régulière d'un véhicule électrique.

Quant aux installations de recharge dans les lieux publics, y compris sur le lieu de travail, elles n'existent pas encore. Leur déploiement est précisément l'un des objectifs prioritaires des partenariats engagés par l'État avec les collectivités locales. Leur nombre et leur répartition entre charge normale (3 kW), accélérée (22 kW) ou rapide (43 kW) devront être optimisés entre la sécurisation de l'usager et les coûts d'investissement. L'hypothèse retenue actuellement, basée sur les premières expérimentations, est que 90 % des recharges se feraient à domicile et/ou la nuit, en charge normale à 3 kW. Elle reste toutefois à vérifier à grande échelle.

La mise en place des points de recharge, élément-clé du déploiement des véhicules électriques, correspond à des postes financièrement non négligeables, tant pour les particuliers (installation domestique à vérifier, voire à sécuriser ou prise de charge dédiée, le tout pouvant aller jusqu'à 1 000 euros) que pour les collectivités publiques (parkings, voirie) ou privées comme les entreprises pour leurs salariés ou les grandes surfaces pour leurs clients (le coût d'un poste de recharge rapide étant de l'ordre de 50 000 euros). Faute de normalisation stabilisée, les installations de charge normale, accélérée et surtout rapide sont encore sous le coup de standards concurrents (connectique, courant alternatif ou continu, etc.). Leur sécurité aura un coût significatif, mal connu aujourd'hui,

et, dans certains cas, les conditions d'implantation restent à préciser : remise en cause de certaines installations domestiques non conformes, modalités techniques, réglementaires et juridiques d'installation de prises et bornes d'alimentation dans les parkings souterrains publics ou privatifs (révision des règlements de copropriété, modalités du comptage des consommations électriques) ou dans les stations-services (installations classées), réalisation de l'alimentation électrique des postes de charge publics, etc.

3 ■ Les contraintes financières feront plus que les incitations financières pour l'essor du marché, qui sera plutôt celui du véhicule hybride rechargeable

3.1. L'économie du véhicule tout électrique n'est pas porteuse d'un marché « grand public » substantiel

En dehors de quelques niches, le marché « grand public » des véhicules tout électriques aura du mal à se dessiner spontanément de manière significative sur la seule base de leurs coûts d'achat et d'usage, même si les aides de 5 000 euros étaient reconduites par les pouvoirs publics (qui auront en outre à subir un manque à gagner du fait de la perte de la TIPP).

En d'autres termes, on voit mal l'horizon à partir duquel le véhicule tout électrique deviendrait moins cher que les véhicules thermiques équivalents. Il est probable que les premiers marchés seront des marchés spécialisés. On pense notamment aux entreprises qui peuvent disposer de points de recharge *in situ* et réduire les coûts d'usage grâce à un kilométrage annuel relativement élevé, avec des parcours prévisibles. Elles peuvent également en retirer un avantage en termes d'image ou de stratégie : adhésion des personnels conducteurs, gage de bon comportement (responsabilité sociale et environnementale), compatibilité avec des objectifs négociés (par exemple, contrat d'objectifs et de moyens entre l'État et un établissement public), etc.

Différents types de véhicules tout électriques qui ne sont pas examinés dans ce rapport pourront trouver leur place pour le transport de personnes (véhicules électriques légers, quads, quadricycles, véhicules à deux ou trois roues) ou dans la catégorie des utilitaires légers, comme ceux utilisés largement par La Poste ou ERDF.

Au-delà de ces marchés spécialisés (quelques milliers ou au mieux quelques dizaines de milliers de véhicules par an pour la France), demeure la question

de l'émergence du marché « grand public », pour faire décoller la demande donc la production, et par conséquent faire baisser les prix. Aujourd'hui, le consommateur « moyen » ne paraît pas spontanément tenté par une expérience qui risque de ne pas lui rapporter financièrement, tout en lui imposant des sujétions nouvelles.

3.2. Des contraintes de circulation seraient favorables à la motricité électrique...

Si on veut faire émerger le véhicule électrique, il faut donc forcer le marché, non pas par des incitations financières puissantes (comme en Israël où la suppression de la taxe à l'importation des véhicules électriques équivaut à une subvention de 45 % sur le prix d'achat) et peu probables sur la durée, mais par des obligations nouvelles qui modifient le spectre des motivations d'achat. On peut ainsi créer un contexte fort en faveur de la motricité électrique en imposant des restrictions de circulation : péage à l'entrée de zones urbaines exonérant certaines catégories de véhicules « propres » ; interdiction d'accès à des voies prioritaires ou à des zones urbaines aux véhicules thermiques dont les émissions seraient supérieures à un seuil donné, voire à tous. Un autre mode de discrimination peut consister en la mise en place d'une taxe annuelle à acquitter sur chaque véhicule, avec exonération totale des véhicules électriques ou hybrides rechargeables.

3.3. ... mais les véhicules hybrides rechargeables en seraient les principaux bénéficiaires

Le véhicule hybride rechargeable est très différent du véhicule tout électrique. Ce dernier se positionne comme un petit véhicule adapté à des trajets courts et répétitifs, un moyen de transport urbain (un second véhicule) ou un véhicule de navetteurs (« *commuters* »). Le véhicule hybride rechargeable peut quant à lui se substituer dans tous les usages au véhicule thermique, en étant électrique en ville et thermique sur des parcours longs : il peut respecter des contraintes réglementaires favorables à la motricité électrique, pour peu qu'il dispose d'une autonomie électrique au moins égale à 20 km en conditions réelles et que son utilisateur puisse choisir lui-même son mode de fonctionnement, thermique ou électrique.

En termes économiques, le véhicule hybride rechargeable est plus coûteux que le véhicule thermique parce qu'il a une double motorisation et davantage de batteries (au moins 5 kWh). Il se compare davantage au véhicule tout

électrique qui a une seule motorisation mais beaucoup plus de batteries (au moins 15 kWh).

La recharge du véhicule hybride rechargeable dure environ deux heures. Elle est donc possible sans risque sur des prises existantes en 220 volts, alors que la recharge du véhicule tout électrique nécessite des alimentations sécurisées qui sont encore à mettre en place.

3.4. Il n'est pas évident que les achats non justifiés par la seule rationalité économique se portent sur le véhicule tout électrique

Dans ce qui précède, l'hypothèse prise en compte est celle d'une attitude rationnelle de l'automobiliste au plan économique. D'autres critères de choix existent, par exemple l'affichage d'un statut social, qui conduit à choisir certains modèles ou certaines marques, le souci de sécurité qui justifie l'achat d'un véhicule plus gros et plus lourd que nécessaire, ou un comportement soucieux de l'environnement. Une automobile s'achète aussi sur un coup de cœur, pour faire moderne ou pour le prestige. Le véhicule tout électrique peut-il profiter de ces divers comportements ? Il y aura sans conteste des acheteurs. Seront-ils en nombre suffisant pour constituer un marché significatif ?

Le véritable lancement de ce marché pourrait aussi résulter d'une révolution technologique, toujours envisageable mais rarement prévisible. En ce qui concerne le stockage de l'énergie embarquée, rien n'est moins sûr actuellement, les informations disponibles ne laissant pas entrevoir de mutation technologique prochaine. En tout état de cause, l'expérience montre qu'en matière de mobilité automobile, un long délai est nécessaire pour passer de l'innovation à la diffusion en série de nouvelles technologies. À l'horizon du présent rapport et sans préjuger de ce qui peut survenir, il n'est pas apparu de signe précurseur d'une telle révolution.

4 ■ Pour les pouvoirs publics, l'atteinte d'objectifs généraux de réduction des émissions passe d'abord par l'incessante amélioration des performances des véhicules thermiques

L'amélioration des performances des véhicules thermiques conventionnels est encore et pour longtemps la voie la plus efficace pour atteindre les objectifs globaux de réduction des pollutions atmosphériques urbaines et de réduction des émissions de CO₂. Cette voie, qui passe par une électrification partielle

(*stop & start*, récupération d'énergie de freinage, etc.) est à la fois crédible (à partir de la situation de référence de 2007, on peut obtenir des gains de 50 % avec les techniques disponibles) et incontournable (si l'on considère que, à horizon de 15-20 ans, entre 85 % et 95 % des véhicules neufs commercialisés seront toujours des véhicules à motorisation thermique ou hybride).

Concernant les émissions de CO₂, les perspectives attachées au véhicule électrique sont intéressantes en France, même s'il paraît exclu de compter exclusivement sur le rechargement de nuit à partir d'électricité d'origine nucléaire ou renouvelable. En effet, les utilisateurs, par nécessité, auront tendance à recharger leurs batteries dès qu'ils le pourront (en particulier sur le lieu de travail) et pas seulement à des heures choisies (spécialement la nuit). Les émissions de CO₂ des véhicules électriques « du puits à la roue » risquent donc d'être en France plus proches de 30-40 g CO₂/km que des 10-20 g CO₂/km généralement avancés, ce qui ne remet pas en cause pour autant la situation privilégiée de la France sous cet aspect.

Les mix énergétiques étant, dans les autres pays, généralement plus carbonés qu'en France (en moyenne, environ 80 g CO₂ par kWh produit), les émissions globales des véhicules électriques y sont comprises entre 80 et 120 g CO₂/km selon les études et les pays (Allemagne, États-Unis, Japon, Israël). En Inde (plus de 950 g CO₂/kWh produit), en Australie (920 g CO₂/kWh produit) ou en Chine (800 g CO₂/kWh produit), nations où la production d'électricité se fait massivement à base de charbon et, pour longtemps encore probablement, sans captation et séquestration du CO₂, les émissions sont équivalentes, voire dépassent celles des meilleurs véhicules diesel d'aujourd'hui. Ainsi, un fort développement du parc des véhicules tout électriques en Chine serait catastrophique sous l'angle des émissions de CO₂.

C'est pourquoi **l'amélioration des performances des véhicules thermiques**, dont le poids sera encore dominant dans les décennies à venir, **doit constituer une voie prioritaire**. Le durcissement sur le long terme, au-delà de 2015, des dispositions communautaires limitant les émissions moyennes de CO₂ des véhicules vendus par les différents constructeurs (actuellement autour de 130 g CO₂/km) doit pouvoir inciter à la mobilisation des progrès technologiques déjà disponibles (un seuil inférieur à 80 g CO₂/km semble accessible). La focalisation sur le traitement du CO₂ ne devra toutefois pas se faire au détriment de la prise en compte des autres polluants (aldéhydes, microparticules, etc.). Certes, les équipementiers sont dans leur rôle quand ils promeuvent leurs innovations et les ensembliers quand ils veillent à la fiabilité des dispositifs

et composants proposés. Néanmoins, il est significatif que les ensembliers sous-traitants des grands groupes se plaignent de façon récurrente de la frilosité de ces derniers à intégrer leurs dispositifs pour des raisons de coût, de fiabilité ou d'indifférence commerciale, alors même que se développent actuellement à grands frais des initiatives industrielles et commerciales portant sur des véhicules hybrides ou électriques manifestement plus coûteux et plus contraignants que les véhicules conventionnels.

D'un point de vue industriel, les constructeurs français jouissent d'une bonne réputation dans la fabrication de véhicules thermiques à faible consommation, tant par la maîtrise des motorisations, notamment diesel de petite cylindrée, que par les innovations développées par les équipementiers français en matière d'assistance électrique et électronique ou d'aide à la conduite.

En définitive, compte tenu des contraintes économiques et des nouvelles sujétions pratiques qu'apporte le véhicule électrique aux qualités pourtant appréciables en certains milieux urbains, l'avenir du véhicule électrique en France apparaît conditionné par trois éléments fondamentaux :

- *d'une part, « amorcer la pompe » et donner envie au consommateur sur des bases techniques et économiques saines.* L'exemplarité de l'État, des établissements publics et des collectivités locales est à cet égard une composante importante du succès des véhicules hybrides et électriques ;
- *d'autre part, être réaliste dans la promotion des objectifs* et ne pas parer abusivement le véhicule électrique de vertus universelles : l'apparition des véhicules hybrides et électriques ne résulte pas d'une révolution technologique, comme, en son temps, le téléphone mobile ou le micro-ordinateur, au sens où le service rendu à l'utilisateur est quasiment le même que celui d'un véhicule thermique ; en revanche, ces nouvelles technologies contribueront à changer le rapport à la mobilité ;
- *enfin, vivre ces évolutions vers la mobilité électrique dans une perspective résolument européenne.* Actuellement, les stratégies industrielles se confrontent (à commencer sur le plan de la communication) : les deux grands ensembliers français affichent leurs ambitions (avec des voies bien différentes) et prennent des risques (Renault), les constructeurs allemands apparaissent plus en retrait, même si les budgets de recherche et de développement sont conséquents (Volkswagen).

Que ce soit au niveau communautaire ou, dans certains cas, au niveau mondial, l'harmonisation des standards est balbutiante, la normalisation reste en

LA VOITURE DE DEMAIN : CARBURANTS ET ÉLECTRICITÉ

cours d'élaboration, la certification en matière de sécurité des batteries en est aux prémisses, l'interopérabilité des systèmes de recharge n'est toujours pas assurée (connectique, nature et tension du courant, etc.) et la diversité domine en matière d'incitation fiscale (primes à l'achat des véhicules, fiscalité attachée à la fourniture de l'électricité de charge, statut des achats par des services publics). La Communauté européenne s'est décidée tardivement à prendre des initiatives sur tout ou partie de ces enjeux (Stratégie commune de l'Union européenne sur la voiture verte en avril 2010, mise en place mi-2010 d'un « *focus group* » européen pour coordonner et orienter les travaux de normalisation). Il y a urgence, pour faire face aux ambitions des pays asiatiques qui pourraient, de fait, imposer leurs normes s'il n'en existe pas d'autres.

Dans ce contexte, l'investissement européen en matière de véhicule hybride rechargeable – qui permet de surmonter une partie des handicaps du véhicule électrique pur – serait susceptible d'assurer une transition certes coûteuse, mais techniquement et socialement intéressante vers la mobilité électrique du futur, qui devra rendre au moins le même service que les véhicules conventionnels d'aujourd'hui, lorsque les batteries auront bénéficié de progrès substantiels sur le plan technique et économique.

Les préconisations

Pour faire face au double défi que représentent l'entrée dans une période de prix élevés de l'énergie et la mise en œuvre de la lutte contre le réchauffement climatique, les pouvoirs publics doivent mener une politique énergétique nouvelle, caractérisée par son ampleur et sa permanence. Dans le cas du véhicule « grand public », à la difficulté inhérente à un tel changement s'ajoute le caractère irrationnel des choix et comportements d'une partie significative des automobilistes. La consommation des véhicules et leur niveau d'émissions polluantes diminueront d'autant plus que l'économie, la sécurité, le caractère utilitaire auront remplacé, dans les esprits, la fascination pour la vitesse, l'accélération, la puissance des véhicules.

Pour diminuer la consommation des véhicules et leurs émissions directes et indirectes, l'État intervient de multiples façons :

- *l'information* : elle permet de justifier toute nouvelle politique, d'y faire adhérer les automobilistes et de leur faire adopter un comportement mieux adapté au nouveau contexte ;
- *l'exemplarité* : l'État doit montrer l'exemple en tant qu'acheteur et utilisateur de véhicules ;
- *la réglementation* : elle permet de réduire la consommation des véhicules et leurs émissions, directement ou en limitant la vitesse, la circulation ou le stationnement ;
- *la taxation* : elle concerne le prix des véhicules et celui de leurs sources d'énergie ;
- *l'incitation financière* : elle peut dissuader l'acquisition des véhicules les plus consommateurs, aider à l'acquisition des véhicules les plus performants, en combinant éventuellement les deux options (« bonus/malus »).

Les mesures à prendre sont à traiter, suivant le cas, au niveau communautaire ou au niveau national.

1 ■ Caractéristiques des véhicules

Diminution de la consommation des véhicules à moteur thermique. Elle devrait se traduire par une limite de 70 g/km des émissions de CO₂ en moyenne pour les véhicules neufs de tourisme.

Cette disposition bénéfique pour l'environnement, plus rigoureuse que les objectifs actuellement affichés (95 g/km), aura pour effet d'accélérer la mise en œuvre de différentes mesures d'économie de carburant associées à une électrification des véhicules.

Affichage du contenu en CO₂ du kilomètre parcouru, « du puits à la roue ».

Il s'agit d'indiquer en particulier les émissions de CO₂ induites par l'usage d'un véhicule électrique.

Harmonisation des vitesses limites sur autoroute à 130 km/heure pour toute l'Union européenne.

L'intérêt de cette mesure réside moins dans les économies directes de carburant grâce à une réduction de la vitesse maximum pour les véhicules existants que dans l'impact sur la conception des véhicules mis en vente sur le marché européen. La perspective d'une limitation généralisée des vitesses inciterait les constructeurs à concevoir des véhicules thermiques et hybrides aux performances moins élevées, donc moins puissants, et à obtenir des gains de consommation à tous les régimes et à toutes les vitesses, y compris en circulation urbaine. La baisse de consommation entraîne une diminution de la pollution, ce qui est particulièrement bénéfique dans les centres-villes très congestionnés.

Obligation, sous trois ans maximum, de doter les véhicules neufs d'un dispositif coupant automatiquement le moteur lorsque le véhicule est à l'arrêt.

Cette mesure impliquerait, pour les véhicules thermiques, la mise en œuvre d'un dispositif de type « *stop & start* », déjà livré en série sur plusieurs modèles. Alors que la pollution urbaine est jugée préoccupante, cela permettrait de réduire les émissions de polluants de 5 % à 10 % en moyenne (20 % à 25 % dans les zones les plus congestionnées). Éviter le fonctionnement des moteurs thermiques au ralenti, c'est réduire à la fois la consommation de carburant, la pollution et le bruit.

Assistance à la conduite automobile : des équipements déjà disponibles sur certains modèles ou prêts à être commercialisés pourraient être rendus obligatoires (affichage sur le tableau de bord de la consommation instantanée ou des écarts par rapport à la consommation optimale, régulateur de vitesse, jauge de pression des pneus, etc.).

Mode de propulsion des véhicules hybrides rechargeables : si la circulation devait être interdite dans certaines zones aux véhicules thermiques, elle devrait être autorisée aux véhicules tout électriques ainsi qu'aux hybrides rechargeables en mode de propulsion électrique (garanti par un signal visible de l'extérieur).

2 ■ Information sur la consommation et les émissions des véhicules

Modification des cycles d'homologation actuels, qui doivent être plus représentatifs de l'utilisation moyenne des véhicules.

Ces cycles ont été conçus pour mesurer la consommation de carburant et les émissions correspondantes de CO₂ des véhicules thermiques. Ils sont maintenant utilisés pour définir l'autonomie des véhicules tout électriques. Or la consommation des auxiliaires (chauffage, climatisation, dégivrage des vitres, etc.) n'est pas prise en compte dans les mesures normalisées actuelles. Elle peut pourtant représenter une proportion significative de la consommation d'énergie dédiée à la seule propulsion du véhicule. Comme les véhicules tout électriques embarquent une quantité d'énergie relativement faible, l'autonomie affichée par les constructeurs, établie par les cycles d'homologation actuels, peut être très éloignée de la réalité.

3 ■ Achat et détention des véhicules

Système de malus annuel : prolonger le dispositif de la loi du 25 décembre 2007 par un système de « malus » annuel qui serait, en pratique, une taxe annuelle sur les émissions de carbone, perçue sur l'ensemble des véhicules en circulation, comme dans la plupart des pays européens.

Le gouvernement a instauré un système de bonus/malus destiné à favoriser l'acquisition des véhicules dont la consommation est la plus basse et à pénaliser ceux dont la consommation est la plus élevée. Cette décision a eu un effet à court terme. Son effet sur l'évolution globale du parc automobile restera

cependant limité si le dispositif ne s'applique pas chaque année à tous les véhicules en circulation.

Limiter les aides publiques aux seuls véhicules électriques utilisant des batteries innovantes (ce qui exclut par exemple les batteries au plomb classiques).

4 ■ Utilisation des véhicules

Donner aux collectivités locales compétentes les pouvoirs concernant la circulation en ville (autoriser les péages urbains dont la tarification pourra être modulée en fonction du type de véhicules, interdire la circulation de certains types de véhicules en centre-ville, etc.).

Supprimer d'ici cinq ans le stationnement résidentiel, après avoir augmenté progressivement son tarif.

La nécessité de réserver des emplacements pour recharger les véhicules électriques entraîne la suppression de nombreuses places de stationnement. Or le stationnement résidentiel sur la voie publique quasiment gratuit (à Paris, une semaine au prix d'une heure de stationnement normal) engendre déjà un surcroît de circulation pour trouver une place libre et donc une augmentation de la consommation de carburant des voitures (estimée à environ 20 % à Paris).

5 ■ Sécurité

Les installations de recharge des véhicules électriques doivent être sécurisées. Les bornes doivent respecter des normes qu'il est indispensable de finaliser sans tarder :

- clarifier et sécuriser les conditions de charge normale à domicile des divers types de véhicules électriques en prescrivant un contrôle préalable par une entreprise qualifiée de l'adéquation de l'installation électrique et en généralisant l'installation et l'emploi de prises dédiées en mode de charge 3 (donc assurant par la présence d'un quatrième fil la continuité terre entre véhicule et borne) pour les véhicules électriques de nouvelle génération, et communiquer largement sur les modalités et précautions pour la charge à domicile ;
- pour les charges normales, accélérées ou rapides dans les lieux publics, finaliser une spécification normative relative aux caractéristiques techniques

et aux conditions d'environnement et d'installation des stations de charge, et imposer un contrôle spécifique de l'installation par une entreprise qualifiée ;

- clarifier les régimes réglementaires des lieux de stockage de batteries, de la cohabitation de bornes de charge accélérée ou rapide et de points de livraison de carburants et de l'installation de bornes de charge accélérée ou rapide en sous-sol.

Mettre en place des préconisations et des modes opératoires pour les interventions d'urgence sur des véhicules électriques accidentés et développer la sensibilisation et la formation des personnels d'intervention correspondants.

Compléter les normes de performances et d'essais des batteries pour en couvrir les principaux risques et en rendre l'application obligatoire, au moins dans le cadre européen.

6 ■ Recherche publique

Donner la priorité aux thématiques qui permettent :

- de réduire la consommation des véhicules thermiques, hybrides rechargeables et électriques ;
- d'améliorer les performances des batteries (coût, densité de stockage, sécurité, mesure du vieillissement) et des systèmes électroniques de contrôle et de puissance.

7 ■ Normalisation

Les travaux de normalisation doivent être accélérés et optimisés entre les échelons nationaux, européens et internationaux. Ils sont indispensables pour assurer tant la sécurité des véhicules et de leurs composants (batteries en particulier) que l'interopérabilité (pour la charge) et les performances énergétiques des véhicules électriques et de leur emploi. La mise en place d'un « groupe stratégique » véhicule électrique à l'AFNOR et d'un « *focus group* » au niveau européen, ainsi que la récente mise à jour de l'accord entre l'ISO et la CEI au plan international vont dans le bon sens. Mais beaucoup reste à faire pour concrétiser les intentions, réaliser les consensus nécessaires au plan industriel et pour articuler correctement les réglementations nationales avec les normes européennes et internationales.

8 ■ **Transports urbains et autres mobilités**

Le développement des transports alternatifs (transports collectifs, deux roues, etc.) et une meilleure organisation de la mobilité automobile (autopartage, covoiturage) ne font pas partie du champ du présent rapport, mais leur amélioration quantitative et qualitative est une clé de la réduction de l'utilisation du véhicule individuel. Ces moyens de transport offrent également d'autres voies de pénétration de l'électricité pour la mobilité urbaine. Il est nécessaire, par ailleurs, de limiter les émissions sonores autorisées pour les deux et trois roues au niveau fixé pour les véhicules de tourisme.

Quelques définitions en préambule

Les véhicules qui font intervenir l'électricité pour se mouvoir sont souvent qualifiés de « véhicules électriques » alors qu'ils relèvent de catégories diverses, précisées par la réglementation européenne ou nationale. Dans le langage courant, la confusion s'est installée, ce qui justifie ces précisions terminologiques.

Le véhicule à moteur thermique (VTh) est un véhicule mû uniquement par un moteur à combustion interne, sans moteur électrique lié à la traction. C'est le véhicule au sens usuel, utilisant pour l'essentiel du gazole ou de l'essence, plus rarement des agrocarburants, du gaz de pétrole liquéfié ou des carburants liquides produits à base de gaz ou de charbon.

Le véhicule électrique (VE) est, selon la réglementation européenne, un véhicule qui « dispose d'une chaîne de traction électrique, c'est-à-dire d'un système consistant en un ou plusieurs dispositifs de stockage de l'énergie électrique (une batterie, un volant d'inertie électromécanique ou un supercondensateur, par exemple), un ou plusieurs dispositifs de conditionnement de l'énergie électrique et une ou plusieurs machines électriques conçues pour transformer l'énergie électrique stockée en énergie mécanique qui est transmise aux roues pour faire avancer le véhicule ». C'est ce qu'on appelle un véhicule « tout électrique », ou un véhicule électrique pur. Les anglophones parlent souvent de BEV, pour « *battery electric vehicle* ». Les dispositifs de stockage doivent être régulièrement rechargés, soit en raccordant le véhicule lui-même à un réseau de distribution d'électricité, soit à l'aide de moyens de production décentralisés, soit en opérant un échange standard des batteries.

Le véhicule hybride (VH) est, selon la réglementation européenne, un véhicule dont la propulsion mécanique est assurée par l'énergie provenant de deux sources embarquées :

- un carburant consommable (identique à celui des VTh) ;

LA VOITURE DE DEMAIN : CARBURANTS ET ÉLECTRICITÉ

- un dispositif de stockage d'énergie, par exemple une batterie, un condensateur, un volant/générateur, etc.

La réglementation française retient une définition un peu différente : « Véhicule doté de deux moteurs, thermique et électrique, fonctionnant ensemble ou séparément ».

La réglementation européenne peut prêter le flanc à interprétation dans la mesure où tous les VTh sont équipés d'une batterie, notamment pour alimenter le démarreur. Si celui-ci est utilisé pour faire se mouvoir le véhicule, ne serait-ce que de quelques mètres, c'est la réglementation française qui est ambiguë. Dans ce rapport sont exclus certains véhicules parfois classés hybrides comme :

- les véhicules dits « micro-hybrides », équipés d'un alterno-démarreur (« *stop & start* ») qui coupe le moteur lors d'un arrêt et le réactive dès que l'on démarre ;
- les véhicules dits « mild-hybrides », équipés d'un système « *stop & start* » et d'un système de récupération d'énergie au freinage.

Ils peuvent engendrer une économie en consommation significative, mais le fait de ne jamais être mis par un moteur électrique les exclut de la catégorie VH.

Les véhicules hybrides doivent être dotés d'une double motorisation, électrique et à combustion interne. Ils sont équipés d'une batterie capable de délivrer une puissance importante mais de faible capacité, autorisant des déplacements en mode électrique pur de 2 km environ. Leur intérêt est d'améliorer le rendement global du véhicule, en permettant au moteur thermique de fonctionner avec un meilleur rendement, en combinant propulsion thermique et électrique. Dans les encombrements, la traction électrique assure implicitement la fonction « *stop & start* ».

Ces véhicules tirent entièrement leur énergie d'un combustible fossile, et l'électricité utilisée par le moteur électrique ne provient que de la conversion de ce carburant en électricité par le moteur thermique et de la récupération d'énergie de freinage.

Le véhicule hybride rechargeable (VHR) est un véhicule hybride dont le dispositif de stockage d'énergie peut être rechargeé grâce à une source extérieure d'électricité. En anglais PHEV (*plug-in hybrid electrical vehicle*), les véhicules

hybrides rechargeables sont généralement dotés d'une capacité de batteries embarquées plus importante que les VH et peuvent se mouvoir en mode électrique pur sur des distances d'environ 15 à 30 km selon les modèles. On peut en distinguer deux principaux types :

- les véhicules disposant d'une double motorisation, à combustion interne et électrique, et capables de se mouvoir grâce à chacune d'elles ;
- les véhicules équipés d'une unique chaîne de traction électrique, mais disposant d'un dispositif de production d'électricité embarqué à base de carburant (« *range extender* »).

Ces véhicules doivent permettre de rouler en ville grâce à l'électricité, et lors des longs parcours en mode thermique. Un commutateur de mode de fonctionnement doit être prévu afin que l'utilisateur puisse forcer un mode plutôt qu'un autre (par exemple, afin de pénétrer dans une agglomération avec la batterie pleine après un parcours routier).

Les pourcentages d'utilisation dans chacun des deux modes, thermique ou électrique, dépendent donc de l'usage que l'on fait du véhicule mais aussi de la configuration du véhicule et éventuellement des choix effectués par l'utilisateur.

Terminologie anglo-saxonne

Certains sigles ont déjà été introduits ci-dessus. Les professionnels utilisent une segmentation désormais partagée au niveau mondial : véhicules conventionnels, véhicules hybrides séparés en *micro*, *mild*, *full* (HEV), *plug-in hybrid electric vehicles* (PHEV), *extended range electric vehicles* (EREV) et enfin les purs *battery electric vehicles* (BEV). À cela s'ajoutent les véhicules à pile à combustible purs (FCEV, *fuel cell electric vehicles*), qui mériteraient bientôt un affinement car la pile à combustible sera, dans un premier temps, associée à la batterie des BEV (Mercedes a ouvert le ban).

Ensuite, s'agissant des hybrides, le dimensionnement de la batterie est déterminé par une sous-segmentation entre le *parallel* (P-HEV), le *series-parallel* (SP-HEV), le *power split* (PS-HEV) et le *power split* avec plusieurs attaques du train (notamment traction et propulsion) dit PS-X-HEV.

Pourquoi parle-t-on à nouveau du véhicule électrique ?

Loin d'être récente, l'histoire du véhicule électrique débute au XIX^e siècle avec la conception de différents prototypes fonctionnant à l'électricité, allant de la carriole à la locomotive. La batterie rechargeable de Gaston Planté en 1859, améliorée par Camille Faure en 1881, donne le coup d'envoi à la fabrication des premières voitures électriques. Un premier projet de grande échelle voit le jour à New York en 1897 : la flotte de taxis y sera alors constituée uniquement de véhicules électriques.

Au début du XX^e siècle, le secteur automobile n'en est qu'à ses balbutiements : les technologies électrique et thermique sont au coude à coude, faisant leurs preuves dans des courses de vitesse ou de distance, ou lors d'expérimentation à échelle réelle. En 1900, sur 4 200 voitures aux États-Unis, 38 % étaient électriques, 22 % à essence et 40 % à vapeur¹. Si la voiture électrique bénéficie de certains atouts comme un démarrage et une conduite faciles, sa rivale thermique remporte rapidement les suffrages grâce à des améliorations rapides en matière d'autonomie et de performance. Elle bénéficie en outre d'un contexte favorable : le pétrole, un carburant plus facile d'emploi car stockable et transportable, atteint des prix abordables. La découverte de grands gisements pétroliers en fait même une solution bon marché². Autre argument, les progrès technologiques sur les batteries stagnent alors que ceux sur les moteurs à explosion sont permanents. L'autonomie limitée des véhicules électriques commence à constituer un frein au développement d'un réseau de transport de qualité, jusque-là cantonné aux villes ou au périurbain³. Le lancement de la Ford T en 1908 sonne le glas de l'ère électrique et le début de l'âge moderne de l'automobile.

[1] Fréry F. (2000), « Un cas d'amnésie stratégique : l'éternelle émergence de la voiture électrique », IX^e Conférence internationale de management stratégique, Montpellier, 24, 25 et 26 mai.

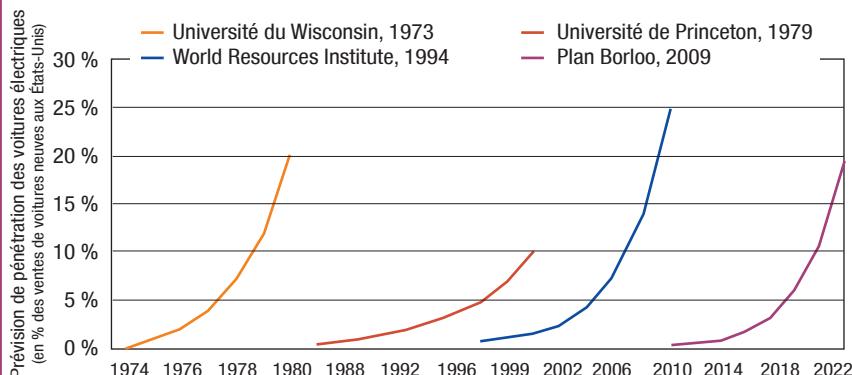
[2] Les Échos (2010), « La longue route de la voiture électrique », 21 juillet.

[3] Transport & Environnement (2009), *How to Avoid an Electric Shock: Electric Cars from Hype to Reality*, novembre.

Par la suite, l'histoire du véhicule électrique se résume à une série de développements avortés. À l'occasion de crises majeures comme les grands chocs pétroliers, le véhicule électrique est souvent apparu comme une alternative possible au véhicule thermique pour ensuite retomber dans l'oubli, pour des raisons économiques ou de limites technologiques (*voir graphique ci-dessous*). Ainsi, le premier choc pétrolier de 1973 et l'embargo de l'OPEP envers les États soutenant Israël remettent au goût du jour cette technologie, qui apparaît comme un moyen de réduire la dépendance à l'égard du Moyen-Orient et notamment de l'Arabie saoudite. Mais le développement du véhicule électrique reste à l'état embryonnaire, freiné par le peu de progrès technologiques sur les batteries et par des prix beaucoup trop élevés. Sous l'impulsion de lobbies écologistes et par une volonté toujours prégnante de diminuer les importations pétrolières nationales, diverses initiatives voient cependant le jour dans les années 1990 : la Californie vote le *Zero Emission Vehicle Act* en 1990 ; General Motors lance l'EV1 en 1996, un véhicule produit à un millier d'exemplaires ; une série de modèles est proposée par PSA dans les années 1990 ; Renault réalise différents prototypes de voitures écologiques (la Zoom, la micro-citadine en 1992 ainsi que l'hybride en 1995) ; en 1997, Toyota lance la Prius, première voiture hybride de série ; la Commission européenne finance différents projets de recherche sur le véhicule électrique (Joule I et II notamment). Des coûts prohibitifs expliquent en grande partie l'échec d'un développement à grande échelle.



Comparaison des prévisions d'émergence de la voiture électrique



Source : Frédéric Fréry, ECP, octobre 2009

Le véhicule électrique est aujourd’hui présenté à nouveau comme une réponse efficace permettant de maîtriser, à moyen terme, le triptyque pollution, effet de serre et raréfaction des réserves de pétrole. Le contexte énergétique, climatique et politique explique donc ce regain de popularité. Il s’agit alors de distinguer les effets de mode des tendances véritables afin de déterminer si la nouvelle vague de véhicules électriques a cette fois des chances de s’installer durablement.

1 ■ Un véhicule pour s’affranchir d’un pétrole en voie d’épuisement ?

La peur de l’épuisement des ressources en pétrole n’est pas nouvelle. Le terme « peak oil » ou pic pétrolier a souvent fait la une des journaux pour attirer l’attention sur la raréfaction des réserves pétrolières, bientôt insuffisantes pour répondre à la consommation future. Pourtant, si le ratio « réserves sur consommation annuelle » était de trente ans vers la fin des années 1970, il dépasse maintenant quarante ans. Les raisons en sont diverses : amélioration des taux de récupération, découverte de nouveaux gisements et de « nouveaux pétroles », notamment « non conventionnels ». Sans même parler de pic pétrolier, les tensions croissantes sur l’équilibre entre offre et demande expliquent la volonté du monde politique de favoriser le développement de véhicules s’affranchissant, au moins en partie, de l’énergie fossile. De fait, la demande en produits pétroliers devrait croître fortement si les tendances persistent :

- les flux de marchandises transportées devraient fortement augmenter, au niveau international comme national. Les estimations du Centre d’analyse stratégique prévoient que, si les tendances se poursuivent, les volumes échangés par voie maritime pourraient quadrupler¹ : le pétrole devra de plus en plus être utilisé pour les voies maritimes stratégiques ;
- si le taux d’équipement (voitures pour 1 000 habitants) commence à stagner dans les pays développés, l’augmentation des richesses dans les pays émergents se traduit par des flottes de véhicules de plus en plus importantes. Alors que le taux de motorisation de l’Europe est de 587 véhicules pour 1 000 habitants, celui de la Chine est de l’ordre de 40 mais croît à un rythme élevé².

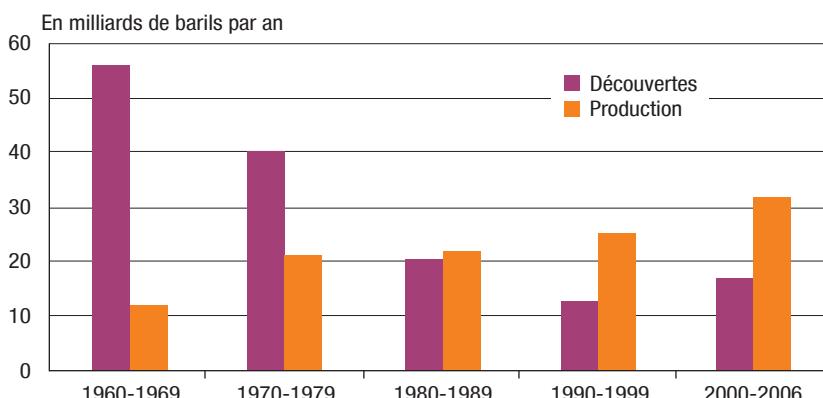
[1] Centre d’analyse stratégique [2010], *Le fret mondial et le changement climatique*, rapport de la mission présidée par Michel Savy, Paris, La Documentation française.

[2] D’après le U.S. Department of Energy, le nombre de voitures en Chine a augmenté de 20 % par an depuis les années 2000, contre une moyenne mondiale de 2-3 %.

Du côté de l'offre, il est difficile d'apprécier les réserves de pétrole disponibles. L'exemple récent de la découverte et de l'exploitation de gaz non conventionnels en très grande quantité, que l'on n'imaginait pas il y a encore cinq ans, est là pour le prouver. Les nouvelles découvertes, l'augmentation des taux de récupération ainsi que les pétroles dit « non conventionnels » (bruts extra-lourds et sables asphaltiques du Canada et du Venezuela, ou encore pétrole en offshore profond) laissent à penser que dans les vingt prochaines années, la contrainte viendra moins du manque de ressources que de déséquilibres, plus ou moins longs, entre les capacités de production et la demande :

- les vastes champs qui ont jusqu'à présent assuré la majeure partie de la production arrivent en fin de vie, pour certains. Souvent plus difficiles à exploiter et de taille plus réduite, les nouveaux gisements demandent davantage de ressources humaines et financières, ce qui entraîne des délais de mise en exploitation plus importants. Le rythme des découvertes s'est nettement ralenti depuis les années 1980 (*voir graphique*). Les investissements à réaliser sont considérables et portent aussi bien sur la production et sur le transport que sur la distribution de pétrole¹ ;
- la plupart des réserves (70 %) se trouvent entre les mains des pays de l'OPEP : la dimension géopolitique de l'approvisionnement ne doit pas être ignorée ;

❖ Production et découvertes pétrolières



Source : AIE

[1] Centre d'analyse stratégique (2008), *Perspectives énergétiques de la France à l'horizon 2020-2050*, rapport de la commission Énergie présidée par Jean Syrota, Paris, La Documentation française.

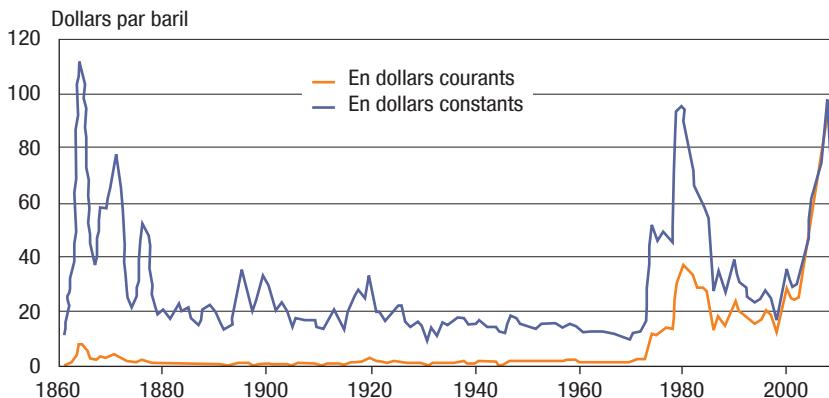
- si les gisements de pétrole non conventionnel constituent une ressource appréciable, leur exploitation pose un certain nombre de problèmes environnementaux, compte tenu des grandes quantités d'eau et d'énergie nécessaires pour extraire ce pétrole et le rendre transportable et utilisable¹.

2 ■ Un véhicule rendu abordable par la hausse du prix du pétrole ?

Le système d'approvisionnement a perdu en souplesse : alors que la demande pétrolière continue d'augmenter, les capacités de production sont insuffisantes pour faire face aux aléas climatiques et géopolitiques ou aux pics de consommation. Cette tension entre consommation et capacités de production se traduit par une hausse des prix. Le 11 juillet 2008, le cours du Brent dépassait 147 dollars par baril, soit un triplement en moins de deux ans. Comme lors des deux précédents chocs pétroliers, en 1974 et 1978, on agite le spectre d'une augmentation permanente des prix du pétrole dans les années à venir, en raison de son épuisement inéluctable.



Évolution du prix du baril de pétrole de 1860 à 2009



Source : BP Statistical Review 2010

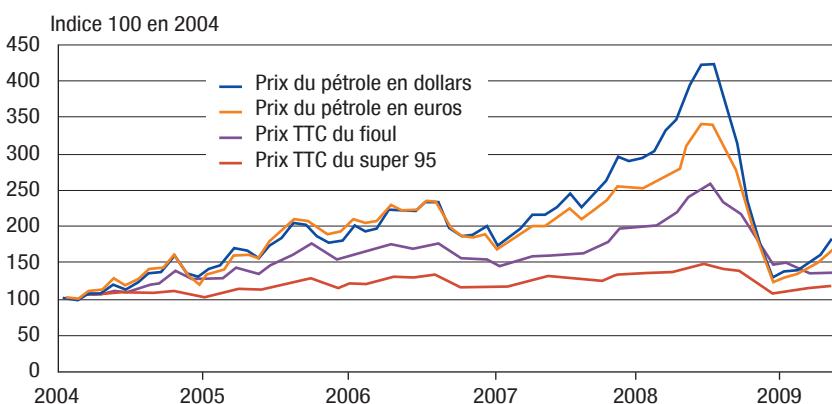
Jusqu'au milieu des années 1970, on pensait que le prix du pétrole allait diminuer. La tendance haussière depuis lors, qui a semblé se confirmer durant les années 2000, pourrait inciter les consommateurs à acheter davantage

[1] Centre d'analyse stratégique [2010], « Fret et changement climatique : comment le fret mondial peut-il réduire son empreinte écologique ? », *La Note d'analyse*, n° 195, septembre.

de véhicules hybrides ou électriques dans l'espérance de diminuer leur facture énergétique. La question est de savoir quelle est l'économie réalisée selon un usage à déterminer (autonomie, parcours quotidien moyen, durée de vie). Reste à savoir si cette hausse continue des prix se vérifiera à l'avenir : si les ressources en pétrole devaient s'amenuiser, à côté de l'émergence de nouvelles technologies et de nouvelles énergies, on pourrait aller vers une utilisation préférentielle du pétrole pour le transport. Aujourd'hui, plus de 35 % du pétrole en termes d'énergie primaire sont utilisés en dehors du secteur des transports¹. En outre, les pays de l'OPEP, qui contrôlent une grande partie de la production mondiale, sont tributaires des revenus pétroliers : une forte hausse des prix augmente leur recette mais contribue aussi au développement de nouveaux gisements, bien souvent hors de ces pays. Toute la difficulté de la politique de l'OPEP est d'arbitrer entre des prix suffisamment élevés pour assurer des revenus confortables et des prix suffisamment bas pour ne pas favoriser l'émergence de nouvelles puissances pétrolières. Enfin, l'évolution du prix du baril dépendra de l'évolution des changes : le baril de pétrole en euro constant connaît donc des variations moins importantes que celles observées en dollar constant (*voir graphique*). À cela s'ajoute l'impact des taxes sur les carburants (TIPP, taxe intérieure sur les produits pétroliers en France), qui atténuent l'effet d'une éventuelle hausse de prix sur le consommateur.



Impact du change et des taxes sur le prix du pétrole en France



Source : CAE, *Les effets d'un prix du pétrole élevé et volatil*, 2010

[1] Agence internationale de l'énergie [2010], *World Energy Outlook 2009*.

3 ■ Face à l'urgence climatique, le véhicule électrique fait-il partie du panel de réponses possibles ?

Si le véhicule électrique permet de rompre la dépendance pétrolière, nombreux sont ceux qui voient aussi en lui une contribution possible du secteur des transports à la nécessaire lutte contre le changement climatique. Il est vrai que les consommations et les émissions de ce secteur n'ont cessé d'augmenter, même au sein de l'Union européenne, fer de lance du volontarisme écologique.

3.1. De plus en plus de critiques contre le véhicule thermique

Des groupes de pression reprochent au véhicule thermique ses dommages importants sur l'environnement :

- la pollution locale, tenue pour responsable de problèmes de santé publique, puisque les moteurs thermiques conventionnels relâchent des particules fines et des gaz toxiques qui peuvent atteindre une concentration dangereuse en ville. La diminution de la pollution en zone urbaine est un critère qui doit être pris en compte et qui milite en faveur de la voiture électrique ;
- le rejet de gaz à effet de serre (GES), responsables du changement climatique, puisque le secteur des transports routiers représente 10 % des émissions mondiales de GES et 17 % des émissions mondiales de dioxyde de carbone.

Les critiques sont dirigées plus particulièrement vers les lobbys des pétroliers et des constructeurs automobiles. Elles rappellent combien l'utilisation du véhicule thermique est profitable à ces industriels : aujourd'hui, le consommateur est captif des pétroliers pour l'approvisionnement en carburant et des constructeurs pour l'entretien du véhicule qui pourrait être moins coûteux avec les véhicules électriques (le marché des pièces détachées est très rémunérateur pour les constructeurs).

3.2. Véhicule propre ou moins « polluant » ?

Les véhicules électriques promettent d'en finir avec les émissions polluantes à l'usage et avec la mécanique bruyante. Aujourd'hui, ces aspects sont systématiquement mis en avant dans les communications officielles, qu'elles émanent du gouvernement ou des constructeurs. En réalité, le bilan écologique complet est loin d'être aussi favorable au véhicule électrique. Il dépend en effet de nombreux paramètres : type de véhicule utilisé, usages, procédé de fabrication, mais surtout du bouquet électrique du pays dans lequel circulera le véhicule.

Un véhicule propre est en général défini comme un véhicule ne produisant quasiment pas d'émissions polluantes lorsqu'il est stationnaire ou en mouvement. Si le « tout électrique » semble celui qui s'en approche le plus, on omet toutefois de considérer dans cette définition que la fabrication des composants, en particulier des batteries, consomme de l'énergie. Sans oublier que, pour certains modèles, le chauffage est assuré par de l'essence ou des GPL. En outre, les étiquetages carbone annoncés par les constructeurs ne comptabilisent pas les émissions du kWh électrique utilisé, qui sont difficiles à déterminer : elles dépendent certes de la structure du parc de production (centrale thermique, nucléaire ou électricité d'origine renouvelable) mais surtout des heures où l'utilisateur rechargera son véhicule (selon la courbe de charge, les moyens de production appelés sont plus ou moins polluants).

3.3. Le véhicule électrique, seule solution pour le transport individuel ?

De la mobilité durable aux améliorations des moteurs thermiques en passant par une meilleure organisation du territoire, le panel des solutions est plus large qu'il n'y paraît. La première étape vers un transport moins consommateur est l'optimisation des performances des véhicules thermiques. Leur consommation unitaire pourrait ainsi être réduite de moitié.

L'électrification de l'automobile est une voie de progrès importante, notamment pour répondre aux problèmes de pollution locale en milieu urbain. Si l'hybride électrique ou le tout électrique répond à cette problématique, certaines techniques d'électrification progressive, telles que le « stop & start », constituent une évolution douce du véhicule thermique, qui par conséquent ne modifie pas le rapport entre le citoyen et sa voiture, mais qui permet une réduction de 5 % à 10 % en moyenne de la pollution locale de l'air et de 20 % à 25 % dans les centres-villes les plus encombrés.

4 ■ Les mesures gouvernementales avantagent-elles les voitures électriques ?

La voiture électrique ou hybride suscite l'intérêt des pouvoirs publics depuis quelque temps, si l'on en juge par les divers programmes financés par les gouvernements. Ainsi, la France a mis en place des mesures techniques et économiques visant à développer les véhicules moins polluants, spécialement le véhicule électrique qui bénéficie d'un bonus de 5 000 euros, plafonné à 20 %

du prix batteries incluses¹. Outre-Atlantique, le gouvernement Obama parie sur le développement du véhicule électrique et investit massivement dans les batteries. Lors de sa campagne électorale, Barack Obama avait promis qu'un million de ces voitures seraient mises en circulation d'ici à 2015. Il a annoncé en 2009 un investissement de 2,4 milliards de dollars pour l'amélioration des batteries. Par ailleurs, le gouvernement fédéral propose une remise d'impôts (« *tax credit* ») de 7 500 dollars pour l'achat de certains types de véhicules. Des États offrent des aides supplémentaires, telle la Californie (plus 5 000 dollars). La Chine a quant à elle introduit un mécanisme de subventions pour les voitures propres pour des montants pouvant atteindre 12 000 euros, ce qui est considérable pour le pays. Il s'agit en priorité de diminuer la dépendance au pétrole et la pollution locale due au transport, mais aussi de réorienter l'industrie.

Les aides de l'ADEME ne semblent profiter ni à l'environnement ni aux avancées technologiques

L'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (ADEME) octroie une aide comprise entre 2 000 et 3 000 euros pour les acheteurs de voitures particulières et de véhicules utilitaires légers électriques qui ne bénéficient pas du bonus. La liste complète de ces véhicules peut être trouvée sur le site Internet de l'ADEME².

On peut s'interroger sur la pertinence de cette aide. En effet, de tels véhicules ont des performances bien modestes (45 km/h de vitesse de pointe pour l'Estrima Biro ou encore la Ligier Be Sun) et ne peuvent se substituer qu'à des véhicules thermiques ayant une faible consommation, de l'ordre de 2 à 3 l/100km. Par ailleurs, leur durée de vie semble limitée, la plupart d'entre eux étant encore équipés de batteries au plomb comme la Ligier qui n'affiche que deux ans ou 600 cycles de garantie, pour une autonomie de 25 à 75 km selon l'usage.

Sans même entrer dans le débat du contenu en CO₂ du kWh électrique et de celui nécessaire à la fabrication des batteries, on voit que les émissions évitées pendant la durée de vie de ces véhicules est de l'ordre de la tonne de CO₂. En rapprochant cette valeur du niveau de la subvention – 2 000 ou 3 000 euros – on obtient un coût de la tonne de CO₂ évitée plus de 100 fois supérieur au

[1] Aide à l'achat de 5 000 euros pour tout véhicule émettant moins de 60 g CO₂/km [décret n° 2010-447 du 3 mai 2010 modifiant le décret n° 2007-1873 du 26 décembre 2007 instituant une aide à l'acquisition des véhicules propres].

[2] www.ecocitoyens.ademe.fr/financer-mon-projet/vehicule/aides-aux-vehicules-electriques.

prix des permis d'émission sur le marché européen, actuellement proche de 15 euros/t CO₂.

Cette prime ne paraît pouvoir profiter ni à l'environnement ni aux avancées technologiques. En effet, la plupart des véhicules subventionnés – pour ne pas dire leur écrasante majorité (outre ceux cités ci-dessus, notons la Reva, l'Electric Car VOLTEIS, Start Lab - Open Street, etc.) – sont dotés de batteries au plomb, technologie suffisamment mûre pour ne plus nécessiter de subventions, mais surtout aujourd'hui complètement délaissée par les grands constructeurs de VE pour les batteries au lithium-ion sur lesquelles les recherches continuent.

L'Union européenne a choisi la voie réglementaire en décidant d'imposer aux constructeurs automobiles¹ des émissions moyennes de leur flotte de véhicules inférieures à environ 130 g CO₂/km (le chiffre étant calculé par constructeur en fonction du poids moyen des véhicules qu'il produit) à partir de 2012². Dans un premier temps, seuls 65 % des véhicules des constructeurs seront inclus dans le calcul de la moyenne. Ce pourcentage augmentera progressivement jusqu'en 2015. Dans le calcul de la moyenne, les véhicules émettant moins de 50 g CO₂/km comptent pour 3,5 voitures en 2012, ce qui amplifie l'effet en faveur des véhicules électriques purs et des véhicules hybrides rechargeables³. Les émissions de CO₂ des premiers sont considérées nulles (« zéro émission »), ce qui suppose un bénéfice massif pour les constructeurs qui pourraient avoir à payer des « primes sur les émissions excédentaires » allant jusqu'à 95 euros par gramme moyen excédentaire et par véhicule vendu⁴. Les véhicules hybrides rechargeables peuvent eux aussi contribuer à faire baisser la moyenne des constructeurs, leurs émissions étant calculées selon une méthode plus complexe⁵ : on commence le cycle de mesure avec un véhicule aux batteries chargées, on roule en mode électrique jusqu'à déchargement des batteries

[1] Les constructeurs produisant moins de 10 000 véhicules par an peuvent se faire dispenser de cette mesure sous certaines conditions.

[2] Règlement [CE] n° 443/2009 du Parlement européen et du Conseil du 23 avril 2009 établissant des normes de performance en matière d'émissions pour les voitures particulières neuves dans le cadre de l'approche intégrée de la Communauté visant à réduire les émissions de CO₂ des véhicules légers.

[3] Ce mécanisme diminue ensuite graduellement jusqu'en 2016, où un véhicule électrique est comptabilisé avec un facteur 1.

[4] Pour les dépassements de plus de 3 g CO₂/km. Pour les dépassements inférieurs, il s'agit de chiffres entre 5 €/g excédentaire et 25 €/g excédentaire et par véhicule vendu.

[5] Le calcul se fait conformément au règlement [CE] n° 715/2007, selon la méthode prévue pour les voitures particulières dans le règlement [CE] n° 692/2008, décrite dans le règlement n° 101 de la Commission économique des Nations unies pour l'Europe.

puis on roule 25 km avec le moteur thermique ; on divise alors les émissions de CO₂ mesurées pendant ce cycle par la distance totale parcourue (distance en mode électrique + 25 km). En se fondant sur ces méthodes de calcul, Opel revendique, par exemple pour son Ampera, des émissions inférieures à 40 g CO₂/km, et pourrait ainsi bénéficier tant des mesures d'incitation françaises que des bonifications européennes pour le calcul des émissions moyennes de CO₂.

Ces mesures peuvent conduire des constructeurs spécialisés dans les véhicules thermiques puissants à mettre sur le marché des modèles tout électriques pour la seule raison que ce serait moins coûteux que de payer des pénalités pour dépassement des limites d'émissions fixées par la réglementation européenne.

❖ **Une conséquence surprenante de la réglementation européenne : quand les systèmes de taxe favorisent les stratégies véhicules électriques des constructeurs les moins vertueux**

La réglementation européenne fonde son système de taxe à l'émission de CO₂ sur les émissions moyennes de la flotte de véhicules vendus par un constructeur. Dans ce système, chaque véhicule électrique vendu vient compenser de manière significative les pénalités induites par les véhicules qui dépassent les seuils affichés : un constructeur ayant une stratégie vertueuse sur toute sa gamme est donc moins aidé dans une stratégie ambitieuse en matière de VE qu'un constructeur peu vertueux.

Illustrons le raisonnement par l'exemple fictif d'un constructeur automobile dont les véhicules vendus ont une masse moyenne égale à 1 372 kg, de sorte qu'il est autorisé pour sa flotte à des émissions moyennes de CO₂ de 130 g/km. Comparons alors deux scénarios pour l'année 2012 :

- **scénario 1** : le constructeur vend 1 million de véhicules thermiques neufs par an dont les meilleurs 65 % émettent en moyenne 140 g de CO₂/km. Il est donc obligé de payer une prime sur les émissions excédentaires de 710 euros par véhicule neuf vendu, ce qui correspond à un total de 710 millions d'euros ;
- **scénario 2** : le constructeur vend 1 million de véhicules thermiques neufs par an dont les meilleurs 65 % émettent en moyenne 140 g de CO₂/km mais vend en plus 10 000 véhicules électriques neufs par an au sein de l'Union européenne (soit presque 1 % de ses ventes de véhicules neufs). Dans ce

scénario, sa moyenne d'émissions à prendre en compte dans le calcul des primes sur les émissions excédentaires est d'environ 133 g de CO₂/km. Ainsi, il devra payer 39 euros par véhicule neuf vendu et sa facture finale sera de 39 millions d'euros.

La comparaison des scénarios montre que la vente de 10 000 VE a produit une économie de 671 millions d'euros pour le constructeur. Dans le cas de figure considéré, chaque véhicule vendu lui a permis d'économiser environ 70 000 euros.

Deux scénarios illustrant pourquoi un constructeur automobile pourrait avoir intérêt à vendre des véhicules électriques au vu de la réglementation européenne

Scénario 1	Scénario 2
1 000 000 véhicules thermiques vendus (140 g CO ₂ /km)	1 000 000 véhicules thermiques vendus (140 g CO ₂ /km par véhicule thermique) + 10 000 véhicules électriques vendus
Prime sur les émissions excédentaires à payer par le constructeur : 710 millions d'euros	Prime sur les émissions excédentaires à payer par le constructeur : 39 millions d'euros
Différence : 671 millions d'euros	
Chaque véhicule électrique vendu permet donc d'économiser : ≈ 70 000 euros	

Si le résultat ne dépend pas du nombre absolu de véhicules vendus, il dépend du rapport entre véhicules thermiques et véhicules électriques vendus, avec une sensibilité relativement faible tant que, dans le scénario 2, le constructeur est encore obligé de payer des pénalités (« primes »). Dès que le nombre de véhicules électriques vendus est suffisant pour éviter tout paiement de pénalité, l'ajout d'un véhicule électrique n'a plus d'effet, et fait baisser la valeur (moyenne) associée à la vente d'un véhicule électrique. Avec les mêmes chiffres que précédemment, on obtient par exemple :

- a) si le constructeur ne vend que 1 000 véhicules électriques (moins de 0,1 % de ses ventes totales), l'économie associée à la vente d'un véhicule électrique est de 70 702 euros. En revanche, l'effet sur la somme totale à payer reste faible ;
- b) si le constructeur vend 5 000 véhicules électriques, l'économie associée à la vente d'un véhicule électrique passe à 69 905 euros ;
- c) en revanche, si le constructeur vend 15 000 véhicules, il n'est plus obligé de payer de primes. Par conséquent, l'économie associée à la vente d'un véhicule électrique baisse plus fortement et passe à 47 333 euros.

Le résultat dépend aussi du point de départ du constructeur en matière d'émissions de CO₂. Avec les hypothèses de départ, un constructeur dont les meilleurs 65 % de véhicules neufs n'émettent que 135 g de CO₂/km arrivera plus rapidement au point où il n'aura plus besoin de payer de pénalité, et l'économie associée à la vente d'un véhicule électrique ne sera « que » de 23 500 euros. En revanche, un constructeur dont les meilleurs 65 % de véhicules vendus émettraient 150 g de CO₂/km retirerait 72 968 euros de la vente d'un véhicule électrique (toutes les autres hypothèses restant égales par ailleurs).

Après 2012, les constructeurs devront prendre en compte un pourcentage plus élevé de leurs véhicules vendus dans le calcul des émissions moyennes de leur flotte de véhicules vendus, jusqu'à 100 % en 2015. Supposons que le constructeur de l'exemple ci-dessus ait réussi à faire en sorte qu'en 2015, la moyenne des émissions de CO₂ de tous ses véhicules neufs vendus dans l'Union européenne arrive à 135 g de CO₂/km. En 2015, les véhicules électriques qu'il vendra ne compteront plus que pour 1,5 véhicule et 1 en 2016. Toutes choses égales par ailleurs, l'économie qu'un véhicule électrique lui apportera sera de 18 908 euros, ce qui demeure considérable.

La valeur calculée dépend donc d'un certain nombre de facteurs mais reste conséquente dans un bon nombre de cas. Elle est importante pour les constructeurs n'atteignant pas les objectifs fixés en matière d'émissions de CO₂. Les constructeurs atteignant des niveaux d'émissions conformes aux objectifs peuvent néanmoins bénéficier de la vente d'un véhicule électrique, car le règlement CE n° 443/2009 mentionne la possibilité de créer des groupements de constructeurs, et ainsi de vendre *de facto* ses droits d'émissions. Un constructeur pourra donc bénéficier du véhicule électrique ou bien en évitant le paiement d'une pénalité sur les émissions excédentaires ou bien en obtenant des revenus supplémentaires grâce à des accords avec d'autres constructeurs moins bien placés en termes d'émissions de CO₂.

En conclusion, les ordres de grandeur exposés ci-dessus montrent que, dans certaines circonstances, les constructeurs pourraient, pour ne pas payer de pénalités à l'UE, avoir intérêt à donner gratuitement des véhicules électriques. Même si ce cas de figure n'est pas envisageable pour une multitude de raisons, les ordres de grandeur présentés peuvent inspirer les constructeurs dans le choix de leur politique commerciale et éclairer le lecteur sur les motivations de quelques constructeurs pour lancer leurs véhicules électriques.

5 ■ À chaque constructeur son véhicule électrique : vitrine ou pari sur l'avenir ?

Depuis quelques années, Renault multiplie les déclarations en faveur du véhicule électrique. Le constructeur français a ainsi chiffré à 4 milliards d'euros l'investissement déjà effectué pour le premier modèle de voiture électrique qui a été mis sur le marché début 2011, la Nissan Leaf. Avec ces différents modèles, Renault déclare viser une production totale de 500 000 unités dans les cinq ans.

La course au véhicule électrique est lancée. En 2010, PSA Peugeot Citroën a annoncé la livraison de 500 véhicules électriques sur l'année, 5 000 en 2011, voire 25 000 en 2013. Peugeot a envisagé des partenariats avec Veolia (pour fournir des véhicules dans le cadre du futur Autolib' et pour étudier plus précisément l'optimisation des charges des voitures) et avec Greenwheels (pour un déploiement de plusieurs centaines de véhicules aux Pays-Bas, puis en Allemagne et au Royaume-Uni).

L'écologie est dans l'air du temps et cela n'a évidemment pas échappé aux services marketing des différentes multinationales qui commencent à être bien rodées pour capitaliser sur ce phénomène. Le « tout électrique » apparaît, au même titre que l'hydrogène et la pile à combustible il y a quelques années, comme une technologie de pointe. Arborer son modèle de voiture électrique, c'est se placer à l'avant-garde et afficher son dynamisme. L'initiative de Renault pourrait également conduire ses concurrents à se préparer à tout hasard, à seule fin de prendre date et d'occuper toute la gamme.

6 ■ Et si la Chine misait sur le véhicule électrique ?

Devenue le plus grand marché mondial depuis le début 2009, la Chine est désormais le troisième producteur d'automobiles. Si l'industrie automobile chinoise pariait sur la voiture électrique, cela contribuerait efficacement au déploiement à grande échelle de ce véhicule.

En s'enrichissant, les Chinois passent de la bicyclette au vélo électrique, mais ils entendent bien posséder, à l'avenir, des voitures, symboles d'un développement réussi à l'image de celui des pays du Nord (*voir, en annexe 4, le compte rendu d'une mission effectuée dans ce pays en novembre 2010*). La Chine réfléchit au déploiement de petits véhicules électriques qui résoudraient les problèmes de pollution locale et d'embouteillages. Pour le gouvernement, la mise au point d'une nouvelle technologie, encore non maîtrisée

par les pays du Nord, sonne comme un nouveau départ pour l'industrie automobile chinoise.

En 2008, la NDRC (National Development and Reform Commission) et le ministère de la Technologie ont mis en place un comité d'experts sur les nouvelles technologies¹. Le développement de voitures fonctionnant aux nouvelles énergies a été intégré dans le plan de restructuration et de stimulation de l'industrie automobile. L'objectif est double. À terme, il s'agit de développer la production nationale de véhicules propres, et d'obtenir des droits de propriété intellectuelle. Le gouvernement chinois s'apprête à lancer de grands travaux « pilotes » sur les nouvelles énergies, grâce à des subventions et des primes issues des recettes fiscales. Il a ainsi alloué 2,9 milliards de dollars sur les trois prochaines années au développement d'un véhicule sobre en carbone. Il encourage l'utilisation de voitures à moteurs hybrides et de voitures électriques dans des périmètres limités de grandes villes ou de villes moyennes. Un des objectifs sera d'élever la part des véhicules alternatifs à 20 % de l'ensemble des ventes d'ici à 2015.

Cependant, les avis sont partagés sur les chances de succès du véhicule électrique. Certains officiels chinois rappellent qu'il existe de nombreuses difficultés pratiques à la construction d'une infrastructure adaptée. Tant du point de vue gouvernemental que du point de vue des entreprises, la mise en œuvre est chaotique : certains projets pilotes au niveau des villes ont même des difficultés à se poursuivre. Actuellement, la recherche, la production et les mesures gouvernementales sont mal coordonnées. Les relations entre constructeurs et sous-traitants, entre centres de recherche et entreprises, ne sont pas normalisées.

Pékin envisage de porter la part de marché des petits véhicules (moins de 1,5 l) à 40 %. Un allégement des taxes à la vente pour les véhicules peu consommateurs a été instauré. Le pari est loin d'être gagné : alors qu'en 2004 les voitures compactes représentaient 18,6 % du marché, cette part a progressivement diminué : 12,6 % en 2005, 8,6 % en 2006, 8,3 % en 2007. L'envie de suivre les traces des pays du Nord avec de grosses cylindrées sera peut-être plus forte que le volontarisme du gouvernement à infléchir cette tendance...

[1] Centre d'analyse stratégique [2010], *Les négociations sur le changement climatique : vers une nouvelle donne internationale ?*, janvier ;
www.strategie.gouv.fr/IMG/pdf/Rapport_Negociations_changement_climatique28janvier2010.pdf.

7 ■ Un véhicule plus abordable quand le prix des batteries aura suffisamment diminué ?

Le prix de la batterie explique en grande partie la différence de prix actuelle entre un véhicule électrique et un véhicule thermique. Plus l'autonomie de la voiture est importante, plus ce surcoût augmente. Alors même que la tendance haussière du prix du pétrole est un élément important des stratégies industrielles qui se dessinent pour le XXI^e siècle, la diminution attendue des prix de la batterie pèsera dans la balance lors de l'achat d'un véhicule. Si ces nouveaux véhicules atteignaient des prix similaires à ceux des véhicules thermiques, la décision ne reposerait alors plus exclusivement sur une variable économique. Elle dépendrait néanmoins d'autres paramètres, notamment l'adaptation du consommateur à de nouvelles contraintes (autonomie, recharge) et à de nouveaux usages du véhicule (utilisation en milieu urbain).

L'importance des investissements dans le secteur laisse supposer à certains que les fabricants de batteries seraient en surcapacité de production sur la période 2014-2017. Les États-Unis et le Japon feraient partie des pays les plus touchés : à terme, seuls 6 à 8 fabricants de batteries dans le monde pourraient subsister dans les 5 à 7 ans à venir. La baisse du prix des batteries serait alors accélérée.

8 ■ Les progrès en R & D

Au vu de l'engouement des industries comme des politiques pour la voiture électrique, notamment pour la batterie, qui constitue aujourd'hui le point dur de ces véhicules, les activités de R & D relatives à cette thématique, au niveau public comme au niveau privé, semblent s'intensifier. Cet effort de recherche qui se trouve couplé à de multiples projets pilotes dans différentes régions du monde devrait tendre à améliorer les performances de ces véhicules et à en diminuer les coûts, selon la célèbre règle de la « *learning curve* » ou courbe d'apprentissage. Aujourd'hui, les progrès sont attendus dans deux directions : d'une part, une augmentation de la durée de vie, de la sécurité et de la fiabilité des nouvelles batteries, d'autre part une plus grande autonomie.

Recherche batterie sûre, ↗ peu chère, avec grande autonomie et longue durée de vie

La batterie est un élément-clé des véhicules tout électriques et hybrides rechargeables : elle en conditionne l'autonomie. *A priori*, celle-ci est considérable : on peut en effet juxtaposer, en série ou en parallèle, un grand nombre d'éléments et obtenir un rayon d'action de plusieurs centaines de kilomètres. La berline modèle S du constructeur californien Tesla, attendue pour 2012, devrait pouvoir parcourir, si on en croit les annonces, 256, 368 ou 480 km, en fonction du pack de batteries choisi.

Cette approche se heurte néanmoins à deux contraintes majeures, le poids et le coût de la batterie. Ainsi, pour une autonomie théorique de 100 kilomètres, le coût d'une batterie au lithium varie entre 7 000 et 28 000 euros¹, son poids entre 200 kg et plus de 500 kg. En regard, la batterie au plomb traditionnelle ne pèse qu'une dizaine de kilogrammes pour un coût d'environ 100 euros et répond parfaitement aux besoins d'une voiture thermique, même si l'énergie qu'elle emmagasine est faible.

Dès lors, dans une approche simplifiée, la batterie qui sera choisie pour équiper un véhicule électrique sera le fruit d'un compromis entre autonomie, prix de vente et poids. L'équation est en réalité plus complexe : la batterie doit être sûre, fiable, avec une durée de vie suffisante. Le conducteur préférera aussi qu'elle fonctionne par temps très froid, qu'elle soit capable de le prévenir du nombre de kilomètres qu'il peut parcourir avant de tomber en panne sèche et qu'elle soit rechargeable en quelques dizaines de minutes, voire en quelques minutes. C'est donc la conception même du véhicule qui doit être imaginée avec celle de la batterie : plus le véhicule sera léger et ses auxiliaires économies

[1] L'énergie moyenne consommée par un véhicule automobile d'une tonne pour parcourir 100 km est de 15 à 20 kWh, et le coût moyen actuel d'un kWh de stockage dans une batterie au lithium est de 500 à 1 000 euros.

(chauffage, climatisation, etc.), plus l'énergie demandée sera faible et meilleure sera l'autonomie, ce qui réduira d'autant le coût de la batterie...

Ce chapitre présente l'historique du développement des batteries et de leur utilisation dans les véhicules électriques¹. Il décrit l'état de la technologie lithium-ion, ainsi que ses possibles évolutions. L'état des ressources en lithium ainsi que les techniques de recyclage sont ensuite abordés. Enfin, le chapitre rend compte de la compétition industrielle qui se déroule sous nos yeux pour la conquête du marché des accumulateurs entre les différents continents et leurs industriels. Le lecteur trouvera en annexe une description des principes de fonctionnement des batteries ainsi qu'un historique de l'évolution des technologies utilisant le lithium.

1 ■ Un historique de l'évolution des batteries et de leurs applications au véhicule électrique

L'électrochimie a réalisé d'importants progrès depuis l'invention de la première pile il y a plus de deux cents ans. De nombreuses technologies coexistent, qui diffèrent par la nature des couples électrochimiques ou par les matériaux utilisés dans les électrodes. Chacune répond souvent à un besoin particulier : il n'existe pas d'accumulateur idéal qui serait à la fois peu coûteux, sûr, durable, solide, léger, fonctionnant à toutes les températures et stockant une forte quantité d'énergie. Durant le XX^e siècle, jusque vers 1990, deux types de batteries ont dominé le marché : les batteries acide-plomb et les batteries nickel-cadmium (qui peuvent fournir une plus grande puissance). Cette section décrit les technologies les plus utilisées, en distinguant les accumulateurs traditionnels (plomb, nickel fer, nickel-cadmium) et les accumulateurs de nouvelle génération (nickel-hydride métallique). La révolution introduite par le lithium sera traitée dans la section suivante.

1.1. Les accumulateurs au plomb ont marqué les débuts des véhicules électriques à la fin du XIX^e siècle

Dans sa conception, un accumulateur plomb-acide actuel est très proche de la première pile inventée en 1800 par Alessandro Volta, constituée de couples de disques de cuivre et de zinc, empilés et séparés par un tissu imprégné d'acide citrique ou de saumure. Cet empilement a conduit à désigner ce dispositif de production d'électricité sous le nom de « pile », parfois improprement utilisé

[1] L'énergie moyenne consommée par un véhicule automobile d'une tonne pour parcourir 100 km est de 15 à 20 kWh, et le coût moyen actuel d'un kWh de stockage dans une batterie au lithium est de 500 à 1 000 euros.

pour désigner un accumulateur. Contrairement à ce dernier, une pile n'est pas rechargeable.

Il a fallu ensuite attendre soixante ans pour qu'apparaissent les premiers accumulateurs rechargeables inventés par Gaston Planté : deux feuilles de plomb, séparées par une toile de lin, sont enroulées en spirale et plongées dans de l'acide sulfurique. Vingt années supplémentaires seront encore nécessaires pour que Camille Faure en 1880 recouvre ces feuilles d'une pâte d'oxyde de plomb et d'acide sulfurique, et que le Luxembourgeois Henri Tudor crée la première société les commercialisant.

Le principe repose sur une double sulfatation lors de la décharge : le plomb métallique présent à l'anode se transforme en cristaux de sulfate de plomb en libérant des électrons, tandis que l'oxyde de plomb présent à la cathode se transforme lui aussi en sulfate de plomb. La recharge donne lieu aux réactions inverses. L'électrolyse de l'eau lors de la recharge est l'une des principales réactions parasites : elle conduit à un dégagement d'oxygène et d'hydrogène.

Les batteries au plomb sont encore très largement utilisées de nos jours, en particulier dans les véhicules automobiles. Elles reposent toujours sur le même principe mais ont bénéficié de nombreuses améliorations : les premiers accumulateurs industriels utilisaient des séparateurs en bois !¹ Deux grandes familles existent aujourd'hui :

- les batteries ouvertes, dont la durée de vie varie entre cinq et quinze ans : les gaz produits (oxygène et hydrogène) s'échappent naturellement par les orifices prévus sur le bac, ce qui oblige à ventiler les lieux de stockage. Elles sont parfois qualifiées de batteries « sans maintenance ». C'est une erreur puisque, de fait, leur utilisation conduit à consommer l'électrolyte : néanmoins, cette consommation est si faible que, dans bien des cas, la réserve d'électrolyte d'origine est suffisante pour assurer un bon fonctionnement durant toute la durée de vie ;
- les batteries à recombinaison de gaz qui, comme leur nom l'indique, conduisent à une recombinaison des gaz produits ainsi qu'à une très faible consommation d'eau et évitent ainsi les dégagements d'hydrogène. Elles ne nécessitent par définition aucune maintenance.

[1] Leur rôle était critique dans la durée de vie de l'accumulateur : le bois libère en effet des macro-molécules organiques en milieu sulfurique qui maintiennent la porosité de la matière active.

Les avantages des batteries au plomb sont bien connus :

- un prix particulièrement attractif : moins de 100 euros le kWh ;
- une forte puissance qui, couplée à une bonne résistance aux basses températures, permet un démarrage à froid du moteur ;
- une durée de vie calendaire longue (6 ans lorsqu'elles servent au démarrage d'un moteur, 10 ans pour des applications industrielles, 25 ans pour des dispositifs de secours).

Leurs inconvénients sont également connus :

- elles supportent mal une décharge dite profonde, celle-ci pouvant conduire à une inversion de polarité. Si, dans un premier temps, la réaction d'oxydation à l'anode conduit à transformer le plomb en cristal de sulfate de plomb, sa poursuite entraîne l'apparition d'oxyde de plomb : la tension aux bornes de la pile s'annule alors, puis s'inverse ;
- si la durée de vie est bonne, une utilisation régulière en charge/décharge profonde (ce qui est le cas d'un véhicule électrique) la limite à 500 cycles maximum ;
- certaines batteries donnent lieu à des phénomènes de stratification de l'électrolyte lors de la recharge : la transformation des cristaux de sulfate de plomb (couplée à la disparition des molécules d'eau) provoque l'apparition d'acide sulfurique quasiment pur qui va se concentrer au fond de l'accumulateur. La poursuite de la recharge entraînant une réaction d'électrolyse de l'eau permet de remélanger l'ensemble de l'électrolyte. Lors d'une recharge complète, il est donc important de ne pas l'arrêter en milieu d'exercice, sous peine d'aboutir à un fonctionnement hétérogène des électrodes, avec fatigue rapide de leur partie inférieure ;
- la batterie au plomb ne fonctionne pas par grand froid (environ – 15 °C) que si elle est bien chargée, en raison de la modification de l'électrolyte qui présente, à une telle température, une viscosité plus grande (limitant les phénomènes de diffusion) ainsi qu'une plus forte résistivité, entraînant une chute de tension ;
- enfin, il n'est pas toujours possible de prévenir l'arrêt brutal de la batterie. Le vieillissement d'un accumulateur au plomb dépend du type de technologie utilisé et donc de l'application pour laquelle il a été conçu : de manière simplifiée, il peut être lié à la corrosion des électrodes ou à leur sulfatation progressive. Dans le premier cas, la corrosion peut entraîner soit la destruction partielle de la grille qui conduit le courant, soit l'apparition de dépôts

de matière active en fond de bac et la création d'un court-circuit. Dans le second cas, l'accumulation progressive des cristaux de sulfate sur la surface des électrodes conduit à une dégradation de plus en plus accentuée, mais mesurable, des performances. Une régénération est toutefois possible : elle consiste à injecter des courants électriques afin de dissoudre les cristaux accumulés.

Le principal inconvénient des batteries au plomb tient à la faiblesse de la quantité d'énergie qu'elles peuvent emmagasiner (voisine de 30 Wh/kg, voir le diagramme de Ragone en annexe 1, page 249), ce qui limite l'autonomie à quelques dizaines de kilomètres (à faible vitesse).

Elles ont néanmoins permis les premiers développements du véhicule électrique¹ :

- en 1892, Peugeot construit un quadricycle à moteur électrique ;
- les changements rapides de batteries sont déjà à l'ordre du jour : en 1895, Charles Jeantaud participe à la course automobile Paris-Bordeaux avec un véhicule électrique. Ses batteries au plomb lui assurent une autonomie de 50 à 75 km pour une vitesse inférieure à 30 km/h. Des arrêts sont donc prévus tous les quarante kilomètres pour les remplacer ! Son parcours est malheureusement ralenti par la réparation d'une roue. Il termine l'épreuve mais très loin des véhicules à essence ;
- la *Jamais contente* était équipée d'accumulateurs au plomb (de type Planté) lorsqu'elle a dépassé les 100 km/h en 1899 : le poids de ses batteries, composées de 80 éléments, était d'environ 650 kg ! Son autonomie était d'une soixantaine de kilomètres (à 90 km/h) ;
- Ferdinand Porsche met au point le premier véhicule hybride en 1899 ; en 1903, celui de Louis Krieger parcourt le trajet Paris-Châtellerault sans recharge (307 km).

L'utilisation croissante du pétrole au début du XX^e siècle ne permettra pas l'essor du véhicule électrique qui, dès 1904, n'est plus construit en France que de manière marginale par rapport aux véhicules thermiques. Renault poursuivra cependant la construction de véhicules électriques jusque dans les années 1920.

La crise de 1973 conduira les ingénieurs à reconSIDéRer cette solution, mais à l'abandonner très rapidement : les batteries au plomb ne peuvent décidément

[1] Le lecteur se reportera pour de plus amples détails à l'ouvrage de Pascal Griset et Dominique Larroque, *L'Odyssée du transport électrique*, EDF-DTVE et Cliomédia, décembre 2006.



Source : General Motors

électrique avec son EV1 : avec un poids d'environ 1 400 kg, cette voiture à deux places, élégante, comme le montre l'illustration ci-contre, assurait une autonomie d'environ 110 km.

Aujourd'hui, les véhicules électriques n'utilisent plus ce type d'accumulateur pour la traction. Malgré le développement considérable des technologies lithium-ion et nickel-hydrure métallique, le faible coût des accumulateurs au plomb conduit cependant à les conserver dans de nombreux usages, en particulier pour les véhicules à moteur thermique, équipés ou non d'un dispositif de *stop & start*, ainsi que pour certaines applications stationnaires. Notons toutefois que la Mercedes S 400 hybride ne contient plus qu'une seule batterie lithium-ion !

⌚ Le programme du véhicule électrique EV1 de General Motors

En 1987, lors d'une course trans-Australie, la victoire d'un véhicule à énergie solaire de General Motors eut une double conséquence :

- la présentation par le président de General Motors d'un concept de véhicule électrique au Los Angeles Auto Show de 1990 ;
- l'adoption par l'État de Californie d'une loi imposant aux sept plus grands constructeurs automobiles américains d'inclure dans leurs ventes des modèles à « zéro émission » : 2 % en 1998, 5 % en 2001 et 10 % en 2003, sous peine de ne plus être autorisés à vendre leurs véhicules en Californie !

Dans le prolongement de cette annonce, General Motors testa en 1994 un modèle électrique auprès d'une cinquantaine de particuliers et établit, avec une version particulière, un nouveau record de vitesse : 295 km/h avec des batteries... au plomb !

Le lancement de l'EV1, en 1996, fut l'occasion d'un événement médiatique retentissant, censé préfigurer la production en masse de véhicules électriques. C'était la première voiture dans toute l'histoire de l'entreprise à porter le nom de General Motors et non celui d'une filiale ! Ce modèle n'était

pas assurer une autonomie suffisante pour un poids raisonnable et ne supportent qu'un nombre limité de cycles profonds de charge/décharge. Pourtant, c'est en utilisant des batteries au plomb que General Motors relancera en 1996 le véhicule

pas la transposition d'un véhicule thermique : dès le départ, il avait au contraire été entièrement conçu en fonction des contraintes de l'électricité. Il comprenait de nombreuses innovations destinées à en améliorer l'efficacité, dont certaines ont été utilisées depuis en grande série pour des véhicules thermiques :

- châssis en aluminium ;
- vitres et pare-brise n'autorisant l'échange thermique que dans un sens, ce qui permet une meilleure isolation ;
- démarrage et allumage sans clé ;
- recharge de la batterie lors du freinage ;
- coefficient aérodynamique extrêmement faible ;
- jantes en alliage extra-léger ;
- pneus présentant une faible résistance au roulement (développés par Michelin).

Cette voiture ne pouvait être achetée, elle était uniquement louée pour une période de trois ans au terme de laquelle elle devait être restituée à General Motors. Elle fut construite à 1 117 unités à partir de 1996 mais louée à seulement 800 exemplaires en Californie et en Arizona, ce qui conduisit le constructeur à interrompre l'expérience, en invoquant l'absence de rentabilité du programme. Il reprit l'ensemble des véhicules, alors même que beaucoup d'utilisateurs étaient enthousiastes. En parallèle, en 2003, le programme « Zéro émission » de l'État de Californie fut assoupli.

Le loyer mensuel variait entre 299 et 574 dollars selon les modèles et les remises pratiquées par les États. À l'époque, compte tenu du prix du baril, inférieur à 20 dollars, le coût de l'électricité au kilomètre parcouru représentait entre le tiers et la moitié du prix de l'essence. Les principaux inconvénients provenaient de la faible autonomie du véhicule et de la durée de la recharge. Par ailleurs, les batteries au plomb ne supportent qu'un nombre limité de charges et de décharges quasi complètes.

Ce véhicule connut plusieurs versions : la première utilisait des batteries au plomb de marque Delco pour une autonomie annoncée de 90 à 120 km et un poids de 533 kg. Dans un second temps, les accumulateurs fournis par l'entreprise Panasonic permirent de parcourir 120 à 160 km. Enfin, General Motors fit appel à la technologie nickel-hydrure métallique pour une autonomie de 120 à 240 km.

Le programme a été définitivement arrêté en 2003. Toutefois, le responsable recherche et développement de General Motors a publiquement regretté cet abandon en 2007 : la poursuite du programme aurait permis, selon lui, de mettre au point dix ans plus tôt la Chevy Volt, considérée par certains comme le successeur technologique de l'EV1.

1.2. Au début du XX^e siècle, les batteries nickel-fer sont à l'origine d'une deuxième génération de véhicules électriques

L'engouement pour le véhicule électrique est plus tardif aux États-Unis qu'en Europe et ne se produit véritablement que dans les dernières années du XIX^e siècle. Il repose pour partie sur les batteries au plomb. Au même moment, cependant, Thomas Edison se tourne vers les batteries nickel-fer dont il va tenter d'améliorer les performances pendant une dizaine d'années. Malgré un coût plus important, elles présentaient une densité énergétique plus forte que les batteries au plomb et leur temps de recharge était deux fois moindre. La Detroit électrique, de 1911 à 1916, et la Baker électrique en seront équipées. Ces modèles s'inscrivaient dans le développement plus général qu'a connu aux États-Unis le véhicule électrique de 1900 à 1914. La batterie nickel-fer ne suffira cependant pas à enrayer la montée en régime des moteurs thermiques, qui bénéficieront d'une croissance rapide avec la commercialisation de la Ford T.

La batterie nickel-fer repose sur les deux couples $\text{NiOOH}/\text{Ni(OH)}_2$ et $\text{Fe}/\text{Fe(OH)}_2$. La faible solubilité de ces produits dans l'électrolyte (hydroxyde de potassium) explique un des avantages de ce type d'accumulateur : sa durée de vie. Les batteries nickel-fer, dont l'énergie spécifique est comprise entre 30 et 50 Wh/kg, peuvent fonctionner pendant plus de vingt ans sans difficulté particulière. Elles seront fabriquées aux États-Unis jusque dans les années 1970 mais ne seront plus utilisées pour les véhicules électriques. Les exploitations minières y auront longtemps recours, compte tenu de leur capacité à résister aux vibrations et aux fortes températures, ainsi que de leur très longue durée de vie. On en produit encore en Russie et en Chine. Elles nécessitent une maintenance particulière pour les recharger périodiquement en eau.

1.3. Apparues au début du XX^e siècle, les batteries nickel-cadmium ne sont vraiment utilisées pour les véhicules électriques que dans les années 1990

La première batterie nickel-cadmium a été inventée par le suédois Waldemar Jungner en 1899. Jungner étudiait en parallèle le couple nickel-fer qui était

nettement moins coûteux mais l'efficacité médiocre de sa charge l'a conduit à abandonner cette technologie et à se tourner vers le nickel-cadmium (Ni-Cd).

Ses travaux aboutiront à la construction en Suède d'une première usine de batteries nickel-cadmium dès 1906 (il faudra attendre quarante ans pour voir une fabrication équivalente s'implanter aux États-Unis). Depuis le lancement en 1932 de la première batterie rechargeable pour l'aviation, c'est cette technique qui va permettre l'essor de la société Saft. Jusqu'au milieu des années 1990, elle constituait l'essentiel du marché des accumulateurs dans le secteur de l'électronique grand public (autrement dit des batteries rechargeables).



Les caractéristiques des batteries nickel-cadmium

Ces batteries sont constituées d'une anode de cadmium métallique, d'une cathode d'oxyhydroxyde de nickel NiO(OH) et d'une solution concentrée d'hydroxyde de potassium comme électrolyte. Elles reposent sur les deux couples $\text{Cd}/\text{Cd(OH)}_2$ et $\text{NiO(OH)}/\text{Ni(OH)}_2$. Leur principal avantage est leur durée de vie (plus de 2 000 cycles de charge/décharge), leurs performances constantes dans une large gamme de températures, leur capacité à fonctionner par des températures très froides, jusqu'à - 50 °C. Elles supportent en outre des décharges très profondes. Elles délivrent une tension d'environ 1,3 à 1,4 V en début de décharge et de 0,8 à 1 V à la fin.

Les accumulateurs de type nickel-cadmium, plus performants que leurs équivalents au plomb, ont connu leurs véritables premières applications industrielles dans les années 1950 avant de se développer dans l'automobile au cours des années 1990, équipant des modèles tels que la 106 ou la Saxo de PSA. Malheureusement, leur faible capacité énergétique offrait une autonomie réduite aux véhicules, inférieure à 100 kilomètres.

Ces accumulateurs sont sensibles à l'effet mémoire : s'ils sont chargés et déchargés pendant un grand nombre de cycles toujours de la même façon, ils ne pourront plus délivrer de quantité d'énergie supérieure à celle de la décharge à laquelle ils ont été habitués.

Le cadmium étant un métal lourd particulièrement toxique, une directive européenne de 2006 en a interdit l'utilisation pour le grand public, excepté pour les usages médicaux, les systèmes d'urgence et d'alarme ainsi que l'outillage électrique sans fil. Les industriels peuvent encore l'utiliser mais doivent le recycler.

Ces batteries sont de plus en plus remplacées par les batteries nickel-hydrure métallique et lithium-ion ; elles conservent cependant des marchés de niche compte tenu de leurs capacités à supporter des taux de décharge très élevés sans dommage ni perte de capacité, au contraire des batteries nickel-hydrure métallique ou lithium-ion.

1.4. Les batteries nickel-hydrure métallique constituent désormais le standard des véhicules hybrides

Les batteries nickel-hydrure métallique (dont l'énergie spécifique, autrement dit l'énergie rapportée à la masse, est plus importante que celle des batteries Ni-Cd) sont apparues en 1989 et se sont imposées sur le marché des appareils électroniques portables durant les années 1990 (remplaçant le nickel-cadmium dans de nombreuses applications). Leur capacité énergétique massique est deux fois supérieure à celle des accumulateurs au plomb. Elles sont en outre moins polluantes que les Ni-Cd et peu sensibles à l'effet mémoire qui, dans leur cas, est aisément réversible. Pour ces raisons, elles sont actuellement le standard de l'industrie automobile pour les véhicules électriques hybrides et équipent les Toyota Prius ainsi que les Lexus.

Ces batteries résultent, d'une part, d'une amélioration des électrodes en nickel, réalisée par le Dr. Masahiko Oshitani de la société Yuasa et par l'entreprise Matsushita, d'autre part de la mise au point d'alliages hydrurables de haute énergie à l'anode, par les laboratoires Philips et le CNRS¹ dans les années 1970.

À l'électrode positive, le dihydroxyde de nickel Ni(OH)_2 se transforme en oxyhydroxyde de nickel NiO(OH) . À la négative, l'eau se décompose en ion OH^- et en hydrogène qui est absorbé par le composé intermétallique. L'électrolyte est une solution d'hydroxyde de potassium KOH. La différence de potentiel est d'environ 1,4 à 1,6 V. L'une des caractéristiques de ces batteries réside dans le déplacement des ions hydrogène depuis l'électrode positive vers la négative durant la charge et, en sens inverse, pendant la décharge, sans que l'électrolyte ne prenne part à la réaction et ne soit donc modifié.

Le composé métallique a donné lieu à de très nombreux essais : le métal le plus couramment utilisé aujourd'hui est représenté par la formule AB_5 , où A est un mélange de terres rares (lanthane, cérium, néodyme, praséodyme) et B est du nickel (principalement), du cobalt, du manganèse, et/ou de l'aluminium.

[1] Les accumulateurs développés par le CNRS et Philips reposaient uniquement sur un alliage de terres rares instable en présence d'un électrolyte alcalin : leur durée de vie était donc insuffisante.

Si les premiers travaux menés au Centre de recherche de Battelle à Genève ont mis en avant l'intérêt d'un métal reposant sur un alliage nickel-titanium, Stanford R. Ovshinsky a mis au point un alliage particulier qu'il a breveté et qui l'a conduit à créer en 1982 l'Ovonic Battery Company. General Motors en a acquis le brevet en 1994, l'a utilisé pour l'une des versions de l'EV1, mais l'a revendu au début des années 2000 à une compagnie pétrolière. Le développement de ces accumulateurs aux États-Unis durant les années 1990 a donc été très limité et n'a eu pour résultat que l'achat par un grand nombre de constructeurs étrangers des brevets de la société Ovonic, non pour les exploiter, mais pour éviter tout conflit de propriété intellectuelle avec leurs propres produits !

Ces batteries ont connu au contraire un développement très important au Japon pour équiper non pas des véhicules entièrement électriques, mais des hybrides. Elles sont ainsi devenues la référence pour ce type de véhicules : par rapport aux batteries lithium-ion, elles gardent l'avantage de bien supporter de forts courants de charge et de décharge et sont sûres en cas de surchauffe. De plus, leur coût actuel, d'environ 500 euros/kWh, est légèrement inférieur à celui de la plupart des batteries lithium-ion. La Toyota Prius et la Honda Civic IMA, par exemple, sont toutes deux équipées d'une batterie Panasonic (Matsushita) Ni-MH de 1,5 kWh, pesant 39 kg pour la première et 28 kg pour la seconde.

Si les accumulateurs nickel-hydrure métallique emportent une énergie spécifique supérieure à celle des batteries nickel-cadmium (50 à 80 Wh/kg contre 40 à 50 Wh/kg), leur nombre de cycles de charge/décharge est plus faible, supérieur à 1 000 cycles contre 1 500 pour le Ni-Cd. Leur utilisation pour un véhicule tout électrique est donc difficile. En revanche, ils présentent une durée de vie très importante, correspondant à celle du véhicule, s'ils ne sont utilisés que sur une faible profondeur de charge/décharge, ce qui est le cas dans un véhicule hybride (rechargeable au freinage uniquement) : ils peuvent ainsi être garantis huit ans. À l'heure actuelle, plus de 2 millions de véhicules hybrides fonctionnent avec ce type de batteries.

Compte tenu de leur énergie spécifique limitée et de leur puissance forte, ces batteries sont pour le moment parfaitement adaptées aux véhicules hybrides. Néanmoins, elles pourraient être remplacées par des accumulateurs lithium-ion si le prix de ceux-ci venait à baisser suffisamment.

Cette technologie de batterie a été retenue pour le tramway de Nice qui est alimenté par des lignes électriques aériennes sur l'ensemble de son parcours,

sauf dans les traversées des places Masséna et Garibaldi afin d'en préserver l'architecture.

Notons cependant que, fin 2009, la société Ovonic annonçait qu'elle allait mettre sur le marché une nouvelle génération de batteries nickel-hydrure métallique aux performances comparables, en matière de puissance et d'énergie spécifiques, à celles d'une batterie lithium-ion. Là encore, cette annonce ne s'est pas traduite, jusqu'à aujourd'hui, dans les faits.

1.5. D'autres batteries ont été étudiées mais n'ont pas réussi à trouver leur application dans le domaine du transport

Les batteries Zebra, sodium-chlorure de nickel, ont réalisé une timide percée dans le transport collectif

Même si le brevet relatif aux batteries de type « chlorure de sodium-métal » remonte à 1975, les accumulateurs dits Zebra au sodium-chlorure de nickel (Na-NiCl_2) ont été mis au point en 1985 en Afrique du Sud, dans le cadre du Zeolite Battery Research Africa Project (ZEBRA) mené par Johan Coetzer, d'où leur dénomination. Elles se distinguent par l'utilisation d'un électrolyte en céramique à plus de 250 °C. Dotés d'une bonne durabilité¹ (supérieure à 1 000 cycles) et d'une bonne densité d'énergie (voisine de 120 Wh/kg), ces accumulateurs doivent être équipés d'un système de gestion électronique de la charge pour un fonctionnement optimal. Ils présentent néanmoins un certain nombre d'inconvénients et leur température de fonctionnement en limite l'usage pour les transports ; leur puissance spécifique, voisine de 150 W/kg, est pénalisée par la conductivité réduite de la céramique et peut amener à les utiliser en liaison avec un supercondensateur. Ces batteries doivent être maintenues en température, ce qui entraîne une décharge journalière de 10 % à 20 %. Leur mise en chauffe prend 24 heures.

Ces batteries ont notamment été utilisées dans les transports collectifs (autobus en Italie). Plus récemment, en 2010, elles ont servi à équiper un véhicule utilitaire de Citroën, le Berlingo First, qui, en partant de Shangaï, a rallié Paris en un peu plus de deux mois (avec des batteries renforcées). Fin 2009, La Poste en aurait commandé 250 exemplaires à Peugeot PSA associé à Venturi Automobiles.

[1] Un professionnel a néanmoins souligné que leur durée de vie était mal établie (et faisait l'objet d'informations contradictoires).

Leur développement sera concurrencé par celui des batteries lithium-ion et dépendra vraisemblablement du prix proposé : celui-ci était en mars 2009 d'environ 520 euros/kWh¹.



Une aventure humaine et technologique de 14 000 km en véhicule électrique

« Partis le 3 mai 2010 de l'Exposition universelle de Shangaï, les deux aventuriers Géraldine Gabin et Xavier Chevrin sont arrivés à Paris le 13 juillet au volant de leur Citroën Berlingo "Powered by Venturi" après deux mois et demi passés sur les routes et les pistes à travers la Chine, le Kazakhstan, la Russie, l'Ukraine, la Pologne, la République tchèque, l'Allemagne et enfin la France. Le Citroën Berlingo utilisé pour ce périple est en tout point identique au véhicule qui a remporté la consultation européenne lancée par La Poste. Il est actuellement commercialisé par les réseaux Citroën et Peugeot. Muni de batteries supplémentaires, son autonomie a été constatée en conditions réelles à 500 km ».

Ce véhicule présentait les caractéristiques suivantes :

- batteries nickel-chlorure de sodium « Zebra for Venturi » d'une énergie de 70,5 kWh (3 x 23,5 kWh) ;
- moteur asynchrone triphasé, puissance 21 kW, couple maxi 180 Nm ;
- recharge à 80 % avec chargeur embarqué : 5 heures (220 V-16 A standard) ;
- autonomie : jusqu'à 500 km ; vitesse maximale : 110 km/h.

Source : www.venturi.fr/Venturi-global-challenges2/Mission-02/BERLINGO-POWERED-BY-VENTURI

Les batteries sodium-soufre peuvent constituer une option extrêmement intéressante pour des applications stationnaires

Les batteries sodium-soufre (Na-S) présentent de nombreux avantages (coût faible, bonne densité d'énergie voisine de 107 Wh/kg, densité d'énergie volumique forte, durée de vie très longue, non utilisation de ressources rares), mais elles ne fonctionnent qu'à des températures voisines de 300 à 350 °C et sont fragiles sur le plan mécanique. La rupture de l'électrolyte qui, comme pour les batteries Zebra, est une céramique, peut conduire à un contact direct entre les

[1] Dixon J., Nakashima I., Arcos E. F. et Ortúzar M. (2010), « Electric vehicle using a combination of ultracapacitors and Zebra battery », *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 57, n° 3, mars, p. 943-949.

Classification et caractéristiques des principaux accumulateurs

Type de batterie	Apparition et usages	Avantages	Inconvénients	Particularités pour le véhicule électrique
Plomb	<ul style="list-style-type: none"> - Invention en 1859 - Commercialisation en 1880 - Utilisation très importante durant tout le XX^e siècle 	<ul style="list-style-type: none"> - Faible coût : moins de 100 € le kWh - Forte puissance (plomb spiralé) - Bonne durée de vie 	<ul style="list-style-type: none"> - Énergie spécifique très faible (10-30 Wh/kg) - Mauvaise tenue à une décharge profonde - Recyclage difficile (plomb) 	<ul style="list-style-type: none"> - Utilisation encore importante pour certains usages (démarrage, stationnaire) - Ne peuvent concurrencer les autres batteries pour la traction
Nickel-fer	<ul style="list-style-type: none"> - Mise au point par Thomas Edison (1900-1910) 	<ul style="list-style-type: none"> - Très bonne résistance aux vibrations et aux fortes températures - Très longue durée de vie 	<ul style="list-style-type: none"> - Énergie spécifique faible (30-50 Wh/kg) 	<ul style="list-style-type: none"> - Marché de niche : exploitations minières - Continuent à être produites en Chine et en Russie - Ne peuvent concurrencer les autres batteries pour la traction
Nickel-cadmium	<ul style="list-style-type: none"> - 1899 : invention par le Suédois Waldemar Jungner : applications stationnaires dans l'industrie - 1990 : très forte utilisation durant la deuxième moitié du XX^e siècle 	<ul style="list-style-type: none"> - Stockage massique moyen (40-60 Wh/kg ou 50-150 Wh/L) - Durée de vie très longue - Très bonne tenue au froid - Supportent des décharges profondes 	<ul style="list-style-type: none"> - Énergie spécifique faible (30-50 Wh/kg) - Degrémentation dans le temps (effet mémoire) avec environ seulement 2 000 cycles de charge/décharge - Dangerosité du Cadmium qui conduit à l'interdire pour le grand public 	<ul style="list-style-type: none"> - Autonomie encore insuffisante (80-100 km) - Utilisation en France et aux États-Unis dans les années 1990 pour des véhicules tout électriques - Usage actuel réservé pour des applications militaires et industrielles
Nickel-hydride métallique NiMH	<ul style="list-style-type: none"> - 1970 : électronique - 1990 : secteur des transports 	<ul style="list-style-type: none"> - Stockage massique important (55-70 Wh/kg) - Effet mémoire réversible 	<ul style="list-style-type: none"> - Énergie spécifique faible (30-50 Wh/kg) - Comportement en température 	<ul style="list-style-type: none"> - Autonomie insuffisante pour les véhicules tout électriques (80-100 km) - Convient parfaitement pour les véhicules hybrides non rechargeables concurrencé avec le lithium-ion - Répond partiellement aux besoins des hybrides rechargeables - Concurrencé sur ces deux créneaux par la technologie lithium-ion - Utilisation sur de courtes distances pour des tramways

Sodium-chlorure de nickel Na-NiCl₂ [ZEBRA]	<ul style="list-style-type: none"> - Premier brevet en 1975 - Mise au point en 1985 - 2001 : production industrielle 	<ul style="list-style-type: none"> - Densité d'énergie bonne : 120 Wh/kg - Bonne durée de vie : > 1 000 cycles - Coût modéré : environ 500 €/kWh 	<ul style="list-style-type: none"> - Température de fonctionnement importante : supérieure à 250 °C - Décharge supérieure à 10 % par jour de l'énergie de la batterie pour la maintenir en température - Puissance spécifique faible 	<ul style="list-style-type: none"> - Testé en grandeur nature sur plusieurs véhicules de transport collectif et, en 2010, sur un véhicule effectuant un trajet Shangaï-Paris - La Poste aurait commandé 250 exemplaires d'un véhicule utilitaire Berlingo First muni de cette batterie - Technologie concurrencée par le lithium-ion
Sodium-soufre Na-S		<ul style="list-style-type: none"> - Coût faible - N'utilise pas de ressource rare 	<ul style="list-style-type: none"> - Température de fonctionnement importante : supérieure à 300 °C - Autodécharge importante - Possible combustion en cas de rupture de l'électrolyte 	<ul style="list-style-type: none"> - Utilisation à titre expérimental pour des réseaux électriques - Utilisation pour des applications stationnaires - Aucune application aux transports connue

Source : CAS

deux électrodes et au déclenchement d'une réaction chimique, avec risque de combustion, voire d'explosion. Leur utilisation sera donc réservée à des applications stationnaires : un accumulateur de ce type a été construit au Texas (Presidio) et pourrait délivrer une puissance de 4 MW pendant 8 heures en cas de défaillance d'une ligne électrique. En juillet 2010, EDF a également inauguré une batterie de stockage d'électricité sodium-soufre à Saint-André de la Réunion permettant de restituer une puissance de 1 MW pendant 7 heures. Aucune application aux transports n'est encore répertoriée.

1.6. Les accumulateurs classiques n'offrent qu'une autonomie de quelques dizaines de kilomètres

Les accumulateurs au plomb, nickel-fer ou nickel-cadmium ne peuvent conduire qu'à des autonomies de quelques dizaines de kilomètres (pour une masse de 100 à 200 kg). Le nickel-hydrure métallique répond parfaitement aux besoins d'une motorisation hybride mais pas à ceux d'un véhicule électrique (faible autonomie). La technologie Zebra suppose une température de fonctionnement supérieure à 250 °C, peu compatible avec les transports : elle est néanmoins testée dans plusieurs véhicules. Le sodium-soufre enfin est réservé à des usages stationnaires. Ainsi, aucune de ces technologies ne

permet de répondre aux besoins d'un véhicule électrique : toutes continuent cependant d'être utilisées dans des créneaux particuliers en fonction de leurs caractéristiques (*voir tableau précédent*).

2 ■ Les batteries au lithium : une technologie porteuse de progrès

Les batteries au lithium ont toujours été considérées avec beaucoup d'intérêt, non seulement parce que le lithium est le plus léger des métaux mais aussi parce qu'il dispose d'un fort potentiel électrochimique, qui le conduit à se transformer très facilement en ion Li^+ .

Les premières réflexions sur l'utilisation du lithium pour le stockage de l'énergie remontent aux années 1910. Elles ont donné lieu tout au long du XX^e siècle à de nombreux travaux qui n'ont jamais véritablement abouti. Dans les années 1980, les accumulateurs avec des électrodes de lithium métallique présentaient encore un double défaut, de sécurité d'abord, de vieillissement ensuite : leur capacité déclinait rapidement avec les cycles, ce qui les rendait impropre à un usage commercial. Nous reviendrons sur ce point dans la section suivante où nous examinerons le développement ultérieur des batteries lithium-métal-polymère.

La maîtrise des batteries au lithium provient de trois découvertes extrêmement importantes qui vont permettre leur développement :

- la première réside dans l'invention en 1976 par l'américain Stanley Whittingham du concept d'électrode positive à « intercalation » où les ions lithium viennent s'intercaler dans une structure qui ne contient pas *a priori* d'ions lithium et qui était à l'époque le TiS_2 ;
- la deuxième concerne le remplacement à la cathode du lithium métallique par une structure de carbone dans laquelle là encore le lithium vient s'intercaler : l'idée a été proposée en 1980 par le Français Michel Armand et un autre Français, Rachid Yazami, est le premier à intercaler effectivement du lithium dans le carbone ;
- la troisième sera l'œuvre du professeur américain John Goodenough qui concevra réellement les électrodes à oxyde lamellaire et sera l'auteur des principaux brevets les concernant. Durant son séjour à Oxford, au début des années 1980, il a identifié et mis au point le dioxyde de cobalt et de lithium comme pouvant servir de matériau de cathode. Il recevra en 2001 le Japan Prize pour ses travaux.

C'est à partir de ces trois découvertes que Sony est parvenu à produire en 1991 la première batterie au lithium pour caméscope. Ces accumulateurs reposaient sur une anode en coke. Il faudra attendre 1997 pour voir l'apparition commerciale d'anodes en graphite, qui présentent une capacité spécifique nettement meilleure. En quelques années, ils sont devenus majoritaires dans les appareils électroniques grand public (téléphones, ordinateurs portables, etc.). Ils sont également utilisés dans de très nombreuses applications. À titre d'exemple, ils équipent les satellites mis en place dans le cadre du programme Galileo ainsi que de nombreux drones, ils servent au démarrage de l'alimentation de secours de l'Airbus A350 XWB ou du chasseur multirôles F-35 Lightning II JSF.

Les technologies de batteries au lithium que nous utilisons aujourd'hui n'ont donc qu'une dizaine d'années d'âge, ce qui est très faible. D'autant plus faible que les améliorations technologiques dans la composition de l'anode, de la cathode et de l'électrolyte associé se sont succédé très rapidement depuis dix ans : en 2006, l'Ambassade de France au Japon estimait que, depuis 1991, une trentaine de couples d'électrodes (que l'on peut regrouper en cinq familles principales comme nous le verrons) faisant intervenir du lithium-ion avaient été commercialisés, soit en moyenne une nouvelle combinaison tous les six mois. Les matériaux utilisés sont de plus en plus complexes et les innovations nombreuses.

L'enjeu actuel, qui constitue l'objet de ce chapitre, est de déterminer si ce type de batteries peut permettre le développement du véhicule électrique à un coût raisonnable ou s'il n'est qu'une mode transitoire de quelques années, qui restera marginale par rapport au moteur thermique classique. Nous présenterons tout d'abord les risques associés à ce type d'accumulateurs. Nous étudierons ensuite le lithium métallique, puis les avantages et les inconvénients des autres technologies actuelles avant d'esquisser les développements futurs envisageables.

Précisons que les batteries au lithium constituent un objet d'étude en soi qui donne lieu à de nombreux travaux : les paragraphes ci-dessous visent seulement à dégager quelques idées simples pour la compréhension du lecteur.

2.1. Certaines batteries au lithium présentent un risque d'incendie

Certaines batteries au lithium sont sujettes à des risques d'incendie, de dégagement gazeux, voire d'explosion, ce qui a fortement marqué l'opinion publique.

LA VOITURE DE DEMAIN : CARBURANTS ET ÉLECTRICITÉ

François Savatier¹ cite l'exemple d'un journaliste japonais dont l'ordinateur portable Dell s'est enflammé en public en juin 2006. La crainte d'incidents de ce type a conduit au rappel :

- par Sony en 2006 d'environ 10 millions de batteries contenues dans des ordinateurs portables Dell, Sony, Apple, Lenovo/IBM, Panasonic, Toshiba, Hitachi, Fujitsu et Sharp ;
- par Nokia en mars 2007 de 46 millions de batteries à la suite d'un incident survenu aux Philippines avec un téléphone portable de cette marque.

La mise en contact des deux électrodes constitue l'un des principaux risques d'incendie des batteries lithium-ion. Elle peut provenir soit de l'introduction malencontreuse de particules métalliques au sein de l'accumulateur pendant sa fabrication, soit de l'accumulation d'ions lithium à la surface de l'électrode négative (ou anode) en phase de recharge. La formation de dendrites peut se comprendre en première approximation comme une compétition entre la capacité de l'anode à absorber des ions et le nombre d'ions qui arrivent sur l'anode par unité de temps (autrement dit, le flux d'ions lithium, ou la densité de courant) : si la température de l'accumulateur devient trop basse lors de la charge, les réactions chimiques sont lentes, et les ions lithium auront tendance à s'accumuler à la surface de l'anode sous forme de dendrites.

La formation de dendrites de lithium peut entraîner le percement du séparateur et l'apparition d'un court-circuit entre les deux électrodes. Suivant la conception de la batterie, ce court-circuit peut ne se traduire que par l'apparition d'un courant de forte intensité et par la fusion de la dendrite, supprimant ainsi le contact entre les deux électrodes : seule conséquence, le percement du séparateur conduit à un courant de décharge permanent de l'accumulateur, réduisant d'autant sa puissance. En revanche, dans d'autres cas, le court-circuit peut conduire à une augmentation de température qui entraîne la combustion de l'électrolyte et/ou provoque une réaction d'emballement thermique du matériau de la cathode.

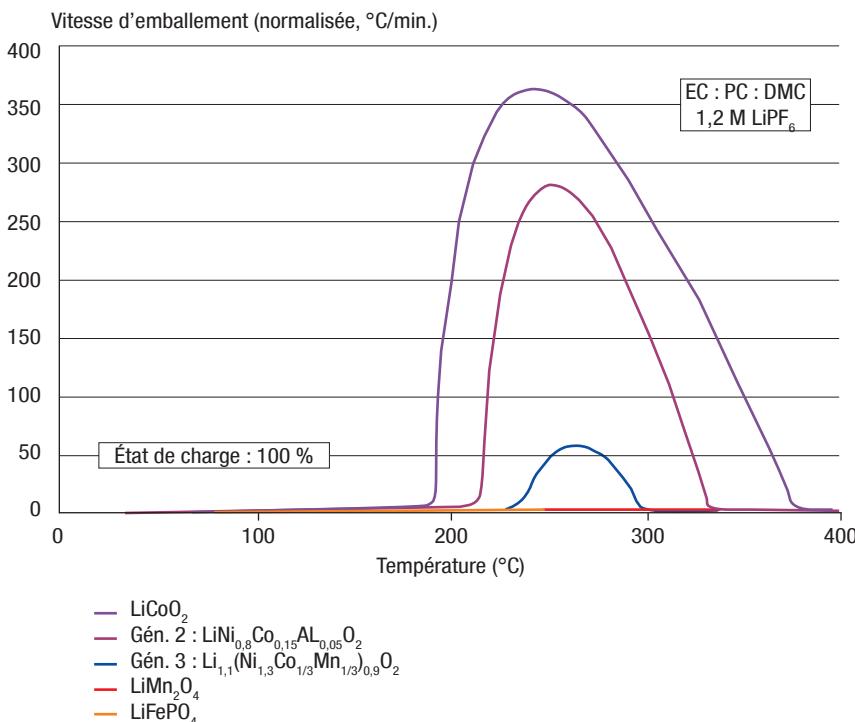
Les travaux, notamment ceux menés par les Sandia National Laboratories, permettent de préciser la température à laquelle cette réaction peut se produire ainsi que la rapidité de l'emballement thermique pour les principaux types de cathodes utilisés aujourd'hui : LiCoO_2 , NCA, NMC, LiMn_2O_4 , LiFePO_4 :

[1] Savatier F. [2009], « Des batteries explosives », *Pour la Science*, n° 387, janvier.

- les batteries utilisant l'oxyde de cobalt à la cathode peuvent conduire à un emballement thermique lorsque la température dépasse 180 °C ;
- à l'inverse, la technologie reposant sur l'utilisation de phosphate de fer limite très fortement ce risque car la réaction n'intervient qu'à plus de 200 °C et n'est que très peu exothermique ;
- les autres technologies lithium-ion (NCA, NMC ou lithium-manganèse spinelle) sont dans une situation intermédiaire : le seuil de température à partir duquel la réaction se produit est plus élevé, mais celle-ci peut néanmoins advenir.



Vitesse d'emballement thermique des principaux types de cathodes



Source : Sandia National Laboratories

Il convient d'insister sur le fait que ces courbes, et notamment la température à laquelle la réaction se déclenche, dépendent de l'état de charge de la batterie.

Soulignons enfin que l'utilisation de titanate de lithium à l'anode permet de s'affranchir de la réaction chimique électrolyte/anode et d'éviter l'apparition de dendrites.

Première conclusion : si l'on s'en tient aux questions de sécurité, les technologies à privilégier reposent sur l'utilisation de phosphate de fer ou de manganèse sous forme spinelle à la cathode, et de titanate de lithium à l'anode. Malheureusement, la tension aux bornes d'une batterie qui utiliserait à la fois le titanate de lithium et le phosphate de fer serait faible (1,8 volt) et la durée de vie des électrodes utilisant l'oxyde de manganèse et de lithium, LiMn_2O_4 , sous forme spinelle est limitée.

L'utilisation des autres types de batteries lithium-ion est possible mais au prix d'un dispositif de gestion adapté afin de garder leur fonctionnement dans des plages acceptables. De fait, toutes les batteries lithium-ion sont munies d'un BMS (*Battery management system*) : son rôle et la fiabilité que l'on en attendra seront néanmoins plus importants lorsqu'un emballage thermique ne pourra être écarté par conception.

2.2. Plusieurs technologies sont en concurrence

De manière simplifiée, cinq compositions différentes de cathode, sur lesquelles le lecteur trouvera plus de précisions en annexe 1, existent aujourd'hui :

- le dioxyde de cobalt et de lithium, présent dans les téléphones mobiles et les ordinateurs portables, mais très peu utilisé pour les véhicules électriques ;
- le NCA, $\text{Li}(\text{NiCoAl})\text{O}_2$, oxyde de nickel dopé avec de l'aluminium et du cobalt (15 %), fabriqué en particulier par Saft ;
- le NMC, $\text{Li}(\text{NiMnCo})\text{O}_2$, avec 33 % de nickel, 33 % de manganèse et 33 % de cobalt ;
- le LiMn_2O_4 : cet oxyde de manganèse est en particulier développé par les Japonais ;
- le phosphate de fer et de lithium, LiFePO_4 , plus récemment développé, en particulier par les Américains et les Chinois.

Le tableau ci-dessous, produit par Saft, donne une première comparaison.

Matériaux alternatifs d'électrode positif

Initialement LiCoO_2 : 100 % Co

Chimie	Énergie (matériaux seulement)	Vie calendaire	Sécurité	Management batterie	Coût
$\text{Li}[\text{NiCoAl}] \text{O}_2$ 15 % Co	529 Wh/kg	10 yr at 40°C 50°C SOC	Réactivité cathode	Contrôle par tension vs. SOC	Référence
$\text{Li}[\text{NiMnCo}] \text{O}_2$ 33 % Co	476 Wh/kg	Lower than NCA Opportunity to improve	Réactivité cathode	Contrôle par tension vs. SOC	Close to reference
$\text{LiMn}_2 \text{O}_4$ 0 % Co	419 Wh/kg	Lower than NCA Mn dissolution	Réactivité cathode	Contrôle par tension vs. SOC	Lower cathode material cost Balance of system same
LiFePO_4 0 % Co	424 Wh/kg	Lower than NCA To be demonstrated	Limitée par réactivité solvant	Stratégie à développer	Lower cathode material cost Systems cost same

SOC : state of charge.

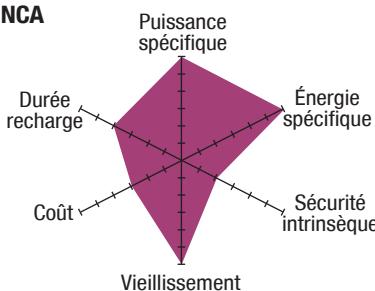
Source : Anne de Guibert (Saft), Panorama 2010

Le tableau suivant, élaboré par le Centre d'analyse stratégique, illustre sous forme d'un diagramme radar les caractéristiques des principaux matériaux en leur attribuant une note entre 1 et 6. Il compare aussi les anodes en graphite et celles en titanate de lithium.

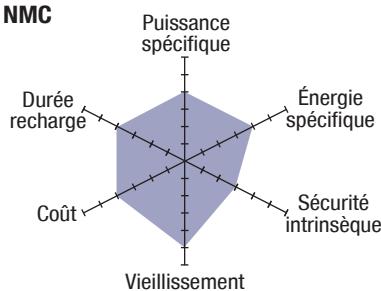
♡ **Caractéristiques des principaux matériaux d'électrodes utilisés aujourd'hui**

CATHODE

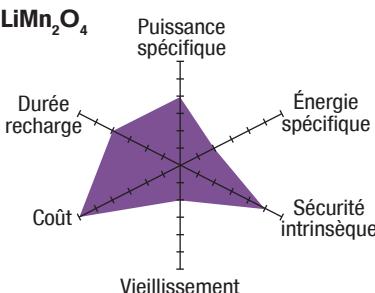
NCA



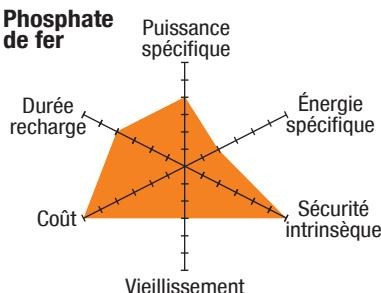
NMC



LiMn₂O₄

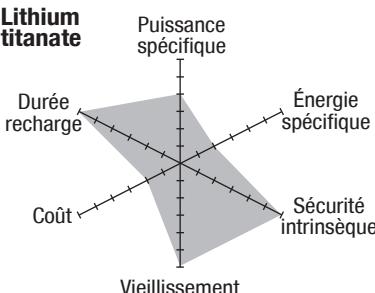


Phosphate de fer

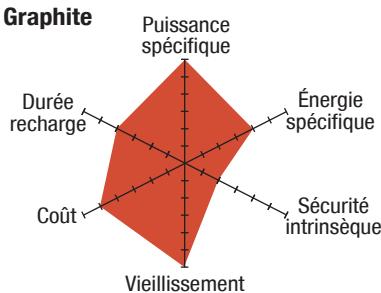


ANODE

Lithium titanate



Graphite



Source : Centre d'analyse stratégique

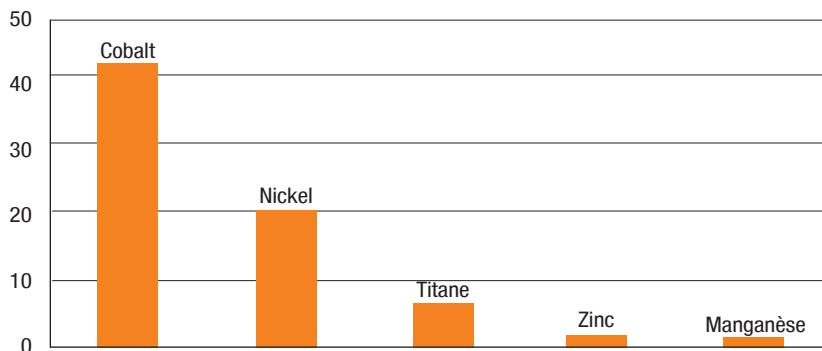
Six critères ont été retenus pour réaliser ces diagrammes :

- *sécurité intrinsèque* : la note correspond à la rapidité d'emballement thermique illustrée par le schéma des Sandia National Laboratories. Elle ne tient pas compte des systèmes de gestion de batteries qui réduisent considérablement les risques associés : la note de sûreté intrinsèque de la batterie NCA aurait été nettement meilleure dans ce cas. Le fonctionnement d'accumulateurs NCA depuis une quinzaine d'années dans des applications professionnelles et depuis quelques mois sur des véhicules hybrides montre en effet leur fiabilité ;
- *énergie spécifique* : la note retenue s'appuie sur le tableau produit par la société Saft (*voir supra*) : elle dépend à la fois de la capacité massique et de la différence de potentiel entre les deux électrodes ;
- *le coût* : l'analyse du coût des batteries montre que la cathode représente à elle seule environ un tiers du coût total d'une cellule. Le graphique suivant (fourni par l'Ambassade de France au Japon) représente les prix (au mois d'août 2010) de différents matériaux utilisés pour sa fabrication. Les compositions utilisant le cobalt et le nickel seront nettement plus coûteuses que celles reposant sur le manganèse ou le phosphate de fer. La notation des électrodes dépendra donc de la proportion plus ou moins importante en cobalt de leur composition ;



Prix au kilo de différents métaux

(en milliers de yens, cours du 12 août 2010, Tokyo)



Source : Destreul P. et Pluchet J. (2010), État de la R & D dans le domaine des batteries pour véhicules électriques au Japon, rapport d'étude, Ambassade de France au Japon, octobre : www.bulletins-electroniques.com/rapports/smm10_041.htm

- *le vieillissement* : les données retenues sont celles qui figurent classiquement dans les différents exercices de notation. L'oxyde de lithium et de manganèse est fragilisé par la dissolution possible du manganèse. Des interrogations existent aujourd'hui sur la durée de vie du phosphate de fer : selon certaines sources, sous réserve de la qualité des formulations et processus, le lithium phosphate de fer peut présenter une excellente tenue au cyclage mais, selon d'autres sources, il pourrait être sujet à un vieillissement précoce ;
- la durée de la recharge : l'absence de réaction chimique anode/électrolyte favorise la rapidité de la recharge et donc les anodes à base de titanate de lithium ; les autres matériaux semblent sensiblement équivalents ;
- la puissance spécifique : les données fournies sont celles qui figurent classiquement dans les exercices de notation.

Deux idées principales sont à retenir :

- il n'existe pas aujourd'hui de batterie lithium-ion qui s'impose comme étant meilleure que toutes les autres : chacune des compositions répond à un certain nombre de critères, et un fabricant sera amener à choisir l'une ou l'autre en fonction des utilisations qu'il envisage ;
- la présentation ci-dessus est simplifiée : les entreprises travaillent aujourd'hui sur des compositions mixtes par rapport à celles présentées.

💡 **Le vieillissement des batteries lithium-ion**

Les mécanismes de vieillissement des batteries lithium-ion sont complexes, ils diffèrent entre l'anode et la cathode et sont corrélés avec les évolutions de l'électrolyte. Une large littérature est consacrée à ces phénomènes. Ils dépendent en particulier de la température de fonctionnement, des courants de charge/décharge et de la plage d'état de charge balayée, qui peut ne porter que sur 20 % ou 30 % de la capacité (cas d'un véhicule hybride) ou au contraire sur 60 % à 80 % de celle-ci (cas d'un véhicule tout électrique).

a) L'électrode négative

Dans le cas du graphite, les principaux mécanismes de vieillissement (qui conduisent à diminuer la capacité et la puissance de l'accumulateur) sont liés à :

- la perte d'ions lithium (retenus dans la couche de passivation) ;
- l'accroissement de la couche d'interface entre l'électrolyte et le graphite.

Notons que des températures élevées sont très pénalisantes pour la couche d'interface graphite/électrolyte.

L'apparition d'une couche de lithium métallique et de dendrites (favorisées à basse température) sur l'électrode négative correspond également à des réactions parasites qui peuvent diminuer la capacité des accumulateurs. Par opposition, les oxydes de lithium et de titane constituent un matériau qui ne se déforme pas, sur lequel n'apparaissent pas de dendrites de lithium et qui est encore stable à 80 °C.

b) L'électrode positive

La baisse de capacité des oxydes de lithium et de métal peut provenir de deux sources principales :

- l'apparition de micro-fissures liées aux contraintes mécaniques dues à l'insertion et à la désinsertion des ions lithium ;
- la formation de couche de surface sur les électrodes en oxyde de cobalt et de nickel et la décomposition du LiPF6, lorsqu'il est utilisé.

Dans le cas des matériaux de type LiFePO₄, la dissolution d'ions ferreux dans l'électrolyte est une source de perte de capacité.

c) L'état de charge, les conditions de cyclage et la température sont des facteurs clés pour réduire ou accélérer le vieillissement :

- des niveaux de charge élevés favorisent la formation de la couche d'interface sur l'électrode négative ;
- les processus d'intercalation et de désintercalation des ions lithium favorisent l'apparition de micro-fissures sur l'électrode positive ;
- un faible état de charge favorise l'apparition d'une couche d'interface sur l'électrode positive en raison de la dégradation de certains sels de lithium ;
- de hautes températures accélèrent les réactions chimiques (décomposition de l'électrolyte et processus de diffusion) mais déstabilisent la couche d'interface, entraînant ensuite une plus forte croissance de cette dernière.

d) Les tests de vieillissement accéléré sont difficiles à définir et à interpréter.
Il faut essayer de traduire dans la réalité le résultat de tests menés dans des conditions de fonctionnement plus sévères que la normale et qui peuvent avoir des effets contradictoires : ainsi, l'augmentation de température améliore les performances en puissance de la batterie mais accélère les phénomènes de vieillissement.

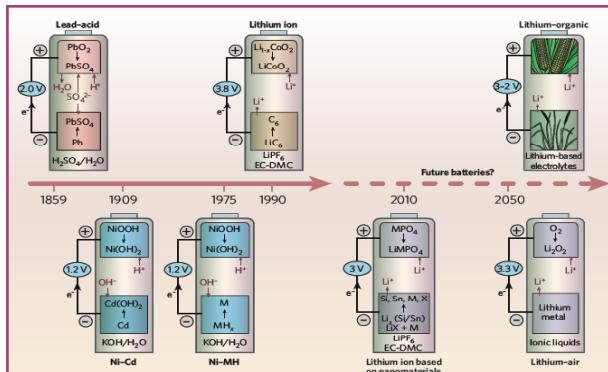
Des résultats plus précis n'ont pas été disponibles pour le présent rapport.

Source : Sauvant-Moynot V. et al. (2010), « ALIDISSI, a research program to evaluate electrochemical impedance spectroscopy as a SoC and SoH diagnosis tool for li-ion batteries », Oil & Gas Science and Technology – Rev., vol. 65(1), IFP, p. 79-89

2.3. Les batteries de demain

Dans un article de la revue *Nature*, paru en février 2008, Michel Armand et Jean-Marie Tarascon ont cherché à envisager ce que seraient les batteries du futur¹. La figure ci-dessous, qui en est extraite, rappelle d'abord l'historique de leur évolution : l'invention par Gaston Planté des premiers accumulateurs rechargeables au plomb en 1859, le développement des batteries nickel-cadmium au début du XX^e siècle, l'apparition vers la fin des années 1980 des batteries nickel-hydrure métallique et enfin, la révolution, sous l'impulsion de Sony, du lithium-ion en 1991. Les auteurs envisagent pour 2010 la mise au point de batteries reposant sur des matériaux nanostructurés, phosphate de fer, notamment, à la cathode, et silicium ou étain à l'anode : la mise en service commerciale d'une telle batterie pourrait intervenir en 2015. Nous commencerons par la décrire, pour évoquer ensuite l'avènement possible, mais à très long terme, d'accumulateurs lithium-air ou, à plus longue échéance encore, de matériaux organiques. Nous avons ajouté à cette liste le développement d'électrolytes solides qui font l'objet d'importantes recherches notamment au Japon, ainsi que la possibilité de concevoir des batteries lithium-nickel.

Evolution de la chimie des batteries



Source : Armand M. et Tarascon J.-M. (2008)

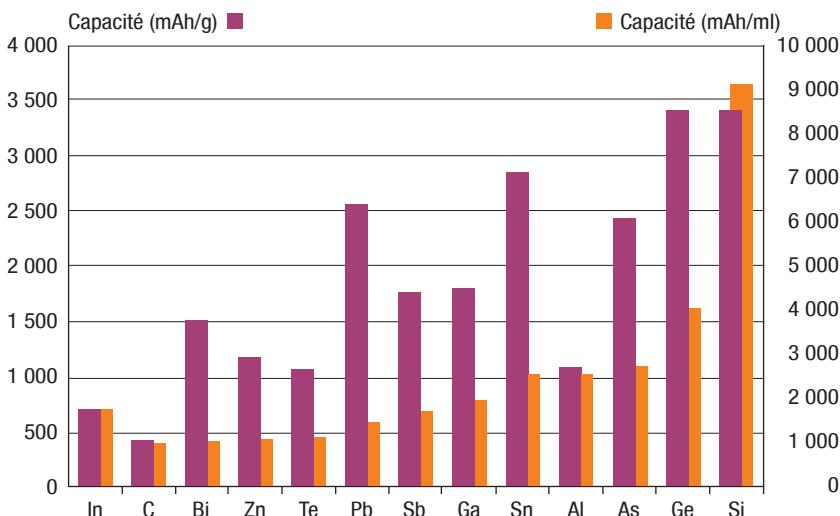
[1] Armand M. et Tarascon J.-M. (2008), « Building better batteries », *Nature*, 451, p. 652-657.

Des structures d'anode à base d'autres matériaux

Les chercheurs s'intéressent à de nouveaux matériaux qui seraient moins sensibles à la température et présenteraient une capacité massique plus élevée. Ils explorent par exemple la possibilité de substituer du silicium au graphite de l'anode : il permet en effet de stocker trois ions lithium par atome de silicium, alors qu'il faut six atomes de carbone pour stocker un ion de lithium. L'avantage est facilement lisible sur le graphique suivant (qui présente la capacité spécifique en violet sur l'échelle de gauche et la capacité volumique en orange sur l'échelle de droite) :



Capacité spécifique et volumique de l'anode en fonction du matériau utilisé

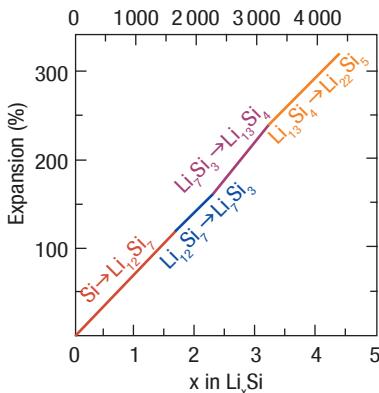


Source : Laboratoire de réactivité et chimie des solides, université de Picardie Jules-Verne

Tandis que la capacité massique d'une anode à partir de graphite est voisine de 400 mAh/g, celle d'une structure à base de silicium pourrait être dix fois plus importante. Un inconvénient majeur réside cependant dans le fait que le silicium ne constitue pas une structure rigide durant l'insertion et le retrait des ions lithium. Comme le montre le graphique suivant, sa structure peut même se déformer jusqu'à atteindre quatre fois son volume quand un atome de silicium accueille cinq ions lithium !



Augmentation de volume d'une cathode à base de silicium en fonction du nombre d'ions lithium par atome de silicium



Source : Laboratoire de réactivité et chimie des solides, université de Picardie Jules-Verne

« Les électrodes gonflent avec la charge et se dégonflent avec la décharge » explique Patrice Simon, électrochimiste à l'université Paul-Sabatier de Toulouse. Les experts soulignent que, dans ces conditions, il est possible d'optimiser une électrode à base de silicium de façon à obtenir un gain d'énergie volumique d'environ 20 %. Il reste cependant à garantir dans le temps la stabilité morphologique de l'électrode afin de parvenir à court, voire moyen terme, à une durée de vie acceptable pour un véhicule électrique. De nombreux laboratoires¹ travaillent sur le silicium, sujet sur lequel la recherche japonaise semble très en avance.

Le graphique présenté plus haut retraçant l'évolution de la chimie des batteries montre que d'autres structures peuvent améliorer les performances de la cathode. Ainsi, l'accumulateur Nextrion, commercialisé par Sony pendant un an en 2005, était composé :

- d'une anode à base d'étain, de cobalt et de carbone, organisée à l'échelle nanométrique, et conduisant à un accroissement de l'énergie volumique d'environ 50 % par rapport aux batteries lithium-ion classiques ;

[1] En France, le Liten, laboratoire d'innovation pour les technologies des énergies nouvelles et les nanomatériaux du Commissariat à l'énergie atomique, est l'un de ceux qui travaillent sur des accumulateurs lithium-ion avec une cathode en phosphate de fer et une anode, à base de silicium, sous forme de matériau composite C-Si. Il obtient ainsi une densité d'énergie de 173 Wh/kg et une tension moyenne de décharge de 3 V. Le recours à de tels composites limite le gonflement et permet de réaliser quelques dizaines de cycles stables. Le Liten envisage d'atteindre des densités spécifiques de 250 à 300 Wh/kg.

- d'une cathode associant de multiples éléments, notamment des oxydes de manganèse, de nickel, de cobalt ;
- d'un électrolyte adapté.

Sa densité énergétique atteint les 158 Wh/kg (contre 144 Wh/kg pour une batterie lithium-ion classique). Des recherches sont également menées sur des mélanges associant cobalt-antimoine, manganèse-antimoine, cobalt-étain au sein d'une matrice adaptée.

Les batteries à électrolyte solide

Des électrolytes solides sont depuis longtemps utilisés pour les piles au lithium, notamment pour les pacemakers, mais ils étaient limités aux applications de faible puissance. Le développement possible des batteries pour véhicule électrique relance cette piste de recherche qui offre plusieurs avantages.

Tout d'abord, comme nous l'avons vu, les électrolytes liquides présentent des risques d'incendie mais aussi de fuite, ce qui n'est pas le cas des solides. De plus, l'utilisation d'un électrolyte solide permet le conditionnement des éléments dans des sachets métalloplastiques plutôt que dans un packaging métallique, ce qui améliore sensiblement la puissance massique de l'accumulateur.

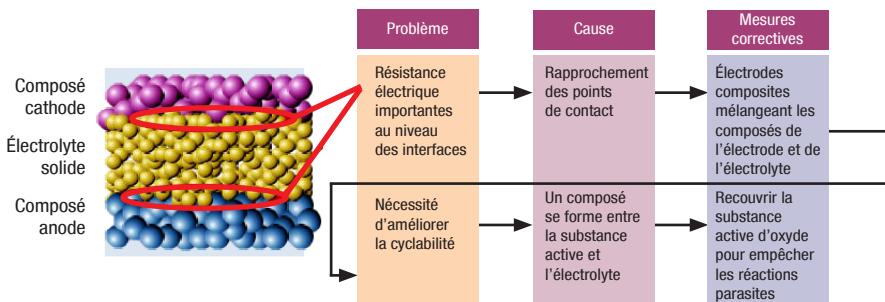
Les technologies actuellement étudiées relèvent de deux familles distinctes :

- les électrolytes inorganiques, généralement à base d'oxydes ou de sulfures, qui peuvent présenter une forte conductivité ionique et une longue durée de vie. La conductivité ionique peut atteindre $3 \text{ à } 5 \cdot 10^{-3}$ Siemens/cm dans le cas des sulfures (contre 10^{-3} S/cm pour les liquides). Même si celle des oxydes est plus faible, leur facilité de mise en œuvre conduit à ne pas les écarter ;
- les électrolytes à base de polymères à forte tension.

Plus encore, peut-être, que pour les accumulateurs lithium-ion à électrolytes liquides, les interfaces qui se formeront entre l'électrolyte et les électrodes vont être déterminantes pour le bon fonctionnement de l'élément. Deux composés sont principalement utilisés comme électrolyte : le $\text{Li}_2\text{S-P}_2\text{S}_5$ et le LISICON (*lithium super ionic conductor*)¹.

[1] Membrane séparatrice, étanche à l'eau, stable en milieu LiOH [hydroxyde de lithium] saturé, stable au contact du lithium-métal, mécaniquement résistante et dont les propriétés de conduction ionique sont optimisées.

✿ Pistes d'amélioration des électrolytes solides



Source : Tech-On ! Tech & Industry analysis from Asia
<http://techon.nikkeibp.co.jp/article/HONSHI/20100628/183827/?P=4>

Parmi les applications les plus avancées, on peut citer celles de :

- Toyota, qui développe ce type de batteries ;
- Samsung, qui a annoncé en mars 2010 avoir fabriqué une batterie à électrolyte solide dont les performances sont comparables à celles des accumulateurs lithium-ion, mais dont le rendement de charge/décharge serait supérieur dans le temps. L'électrolyte solide, d'une épaisseur de 400 microns, serait à base de sulfure ($\text{Li}_2\text{S-P}_2\text{S}_5$) et présenterait une faible conductivité ionique ($0,4 \cdot 10^{-3} \text{ S/cm}$). La cathode, quant à elle, est en NCA, oxyde de nickel dopé avec de l'aluminium et du cobalt (15 %) : autrement dit, une électrolyte solide permet de réutiliser certaines compositions d'électrode précédemment utilisées pour les batteries lithium-ion plus classiques ;
- l'université d'Osaka, qui aurait développé un électrolyte à base de sulfure présentant une conductivité de 3 à 5 mS/cm. Associant également une cathode en sulfure de nickel (fabriquée par broyage mécanique) et une anode en alliage de lithium et d'indium, la batterie correspondante atteindrait des performances de capacité et de cyclabilité jamais égalées pour des électrolytes solides.

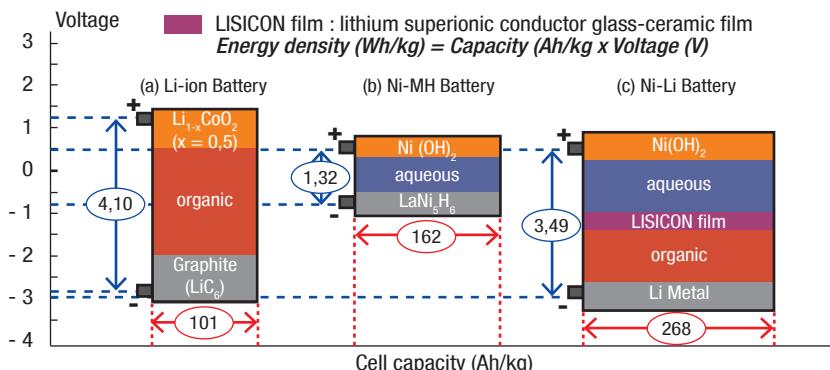
Cette piste technologique est d'autant plus intéressante qu'elle pourrait ouvrir la voie aux accumulateurs lithium-nickel et lithium-air.

Les accumulateurs lithium-nickel

L'emploi de ce couple d'oxydo-réducteurs est *a priori* impossible compte tenu de l'absence d'électrolyte compatible à la fois avec le nickel et avec le lithium métallique. Néanmoins, l'invention d'électrolytes solides le rend possible (*voir figure suivante*). Cet accumulateur, dont la réalisation a été annoncée fin 2009 par le Japan's National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST)¹, offrirait une densité d'énergie spécifique près de 3,5 fois supérieure à celle des batteries lithium-ion actuelles, moins les risques d'incendie.

Auparavant, l'électrolyte liquide présent dans un élément devait être compatible avec les deux électrodes : l'utilisation d'un électrolyte solide, tel le LISICON, permet d'utiliser deux électrolytes différents et, ainsi, d'associer les meilleures propriétés du nickel-hydrure métallique avec celles des batteries lithium-ion. La cathode en hydroxyde de nickel est au contact d'un électrolyte liquide, l'anode en lithium métallique d'un électrolyte organique, les deux étant séparés par une membrane en LISICON. L'énergie spécifique de la batterie obtenue est voisine de 431 Wh/kg, ce qui multiplierait quasiment par trois l'autonomie des véhicules électriques actuels à poids constant.

Énergie spécifique d'un accumulateur lithium-nickel comparé au nickel-hydrure métallique et au dioxyde de cobalt



Source : Huiqiao L., Yonggang W., Haitao N., Haimei L. et Zhou H. (2009), « Rechargeable ni-li battery integrated aqueous/nonaqueous system », Journal of the American Chemical Society, 131(42), p. 15098-15099

[1] Huiqiao L., Yonggang W., Haitao N., Haimei L. et Zhou H. (2009), « Rechargeable Ni-Li Battery Integrated Aqueous/Nonaqueous System », Journal of the American Chemical Society, 131[42], p. 15098-15099.

Une telle batterie nécessite encore de nombreuses études avant de pouvoir être commercialisée :

- l'utilisation d'une membrane solide séparant les électrolytes multiplie le nombre d'interfaces ;
- la tenue dans le temps de la membrane en LISICON, qui ne semble stable que d'un seul côté, n'est pas encore garantie ;
- sa conductivité est particulièrement faible et grève les performances de cet accumulateur ;
- une telle batterie est d'une grande complexité et sa réalisation peut être difficile.

Enfin, la rentabilité économique est loin d'être démontrée.

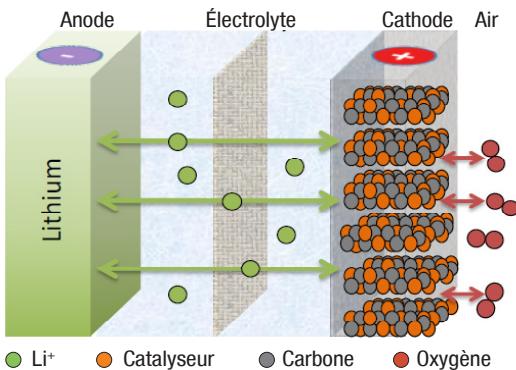
Nota bene : sur ce graphique, l'énergie spécifique (calculée à partir de la matière active des électrodes et de la différence de potentiel) est de 935 Wh/kg pour la batterie Ni-Li, 214 Wh/kg pour le nickel-hydrure métallique et 414 Wh/kg pour un couple graphite/oxyde de cobalt et de lithium.

Les batteries lithium-air

Les batteries lithium-air utilisent l'oxygène présent dans l'air comme matière active à la cathode et reposent sur le couple lithium-dioxygène. Les forts potentiels redox du lithium et de l'oxygène conduisent à une différence de potentiel de 2,91 volts, mais surtout la densité d'énergie massique des deux électrodes est particulièrement forte. La possibilité d'utiliser l'oxygène de l'air, en quantité quasi illimitée, à la cathode permet en théorie d'exploiter toute la capacité d'une anode sous forme de lithium-métal.

Lors de la décharge, le lithium-métal se transforme en ions lithium qui se dissolvent dans l'électrolyte organique et qui rejoignent la cathode. En parallèle, sur celle-ci, l'oxygène de l'air réagit avec les molécules d'eau pour donner naissance à des ions hydroxydes OH^- , puis à de l'hydroxyde de lithium soluble. De manière plus précise, l'oxygène de l'air pénètre dans les pores de la structure en carbone de la cathode pour y subir la réaction de réduction précédemment évoquée.

Structure d'un accumulateur Li-air



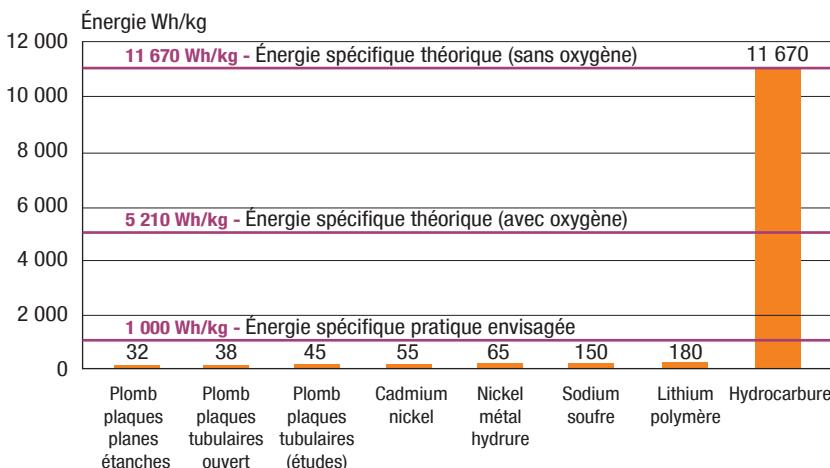
Source : Destruel P. et Pluchet J. (2010), op. cit.

Ainsi, l'énergie spécifique théorique de cet accumulateur serait proche de 5 000 Wh/kg. En pratique, des valeurs de 500 à 1 000 Wh/kg sont envisageables. Elles sont de trois à quatre fois supérieures à celles des batteries lithium-ion actuelles, ce qui conduirait à des autonomies de plus de 300 kilomètres.

Le graphique suivant explique l'engouement qui entoure la mise au point de ces accumulateurs : leur énergie massique théorique se rapproche même de celle de l'essence : 5 210 Wh/kg (en additionnant la masse de la structure carbonée et celle de l'oxygène) contre 11 670 Wh/kg pour l'essence (voire 3 700 Wh/kg si l'on tient compte du rendement du moteur thermique).

En ce sens, la technologie lithium-air est considérée comme le Graal des chercheurs. Le directeur du Centre de recherche sur les transports du Laboratoire national d'Argonne (Chicago) l'exprime de manière explicite : « Le lithium-air est notre but. Nul ne peut prédire l'avenir mais au jour d'aujourd'hui, je considère que c'est le point ultime, l'aboutissement de la quête pour *la* batterie, celle que tout le monde cherche. »

Comparaison des énergies massiques des couples électrochimiques et de l'essence



Source : Commissariat à l'énergie atomique

Comme le rappelle le professeur Tarascon dans l'article paru en 2008 dans *Nature*¹, cette technologie est cependant confrontée aux deux plus importants échecs enregistrés jusqu'à ce jour dans le domaine des batteries : l'incapacité à maîtriser les électrodes reposant sur le lithium-métal et sur l'oxygène. Si la première pile lithium-air a été conçue en 1996, la possibilité de faire fonctionner des accumulateurs lithium-air n'a été véritablement prouvée que récemment.

Ce type d'accumulateurs est confronté aujourd'hui à trois inconvénients majeurs :

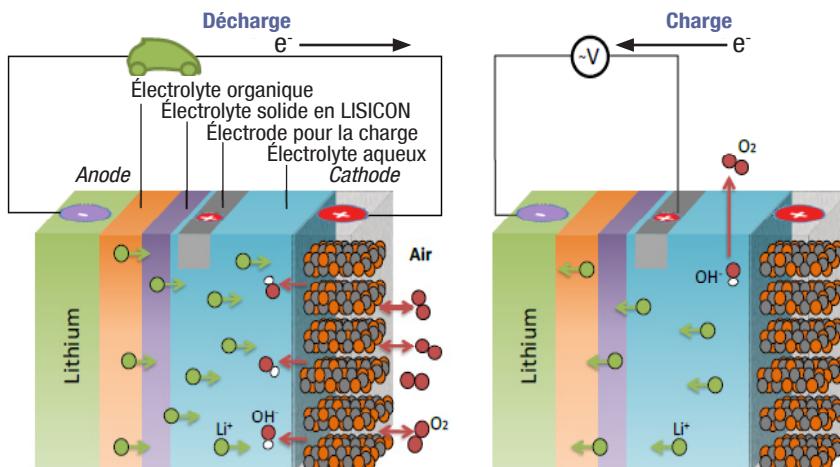
- les molécules d'eau, présentes en très faible quantité dans l'air, peuvent venir au contact du lithium-métal à l'anode et provoquer un dégagement d'hydrogène inflammable, voire explosif ;
- l'azote présent dans l'air peut interagir avec le lithium et conduire à perturber la décharge ;
- un dépôt solide (généralement d'oxyde de lithium Li_2O_2 et de lithine LiOH) peut apparaître au contact de la cathode et de l'électrolyte et boucher progressivement les pores de la cathode.

[1] Armand M. et Tarascon J.-M. [2008], *op. cit.*

Pour surmonter ces obstacles, les chercheurs (en particulier les Japonais) travaillent sur une batterie dite à trois phases que l'on peut représenter schématiquement comme dans la figure suivante.

La décharge est la même que dans l'accumulateur précédent. En revanche, lors de la charge, la cathode est inutilisée : le circuit s'effectue entre l'anode sous forme de lithium métal et l'électrolyte aqueux qui de fait sert de cathode.

✿ **Configuration de l'accumulateur Li-air développé par l'AIST**
[Institut national des sciences et techniques industrielles avancées, Japon]



Source : Destruel P. et Pluchet J. (2010), op. cit.

Ce fonctionnement n'est possible que grâce à l'utilisation d'une membrane particulière qui revêt une triple fonction :

- elle permet le passage des ions lithium ;
- elle empêche au contraire les deux électrolytes utilisés de se mélanger : électrolyte organique du côté de l'anode, électrolyte aqueux du côté de la cathode air ;
- elle bloque enfin l'eau et l'azote, ce qui évite les réactions parasites à l'anode.

Ainsi, lors de la décharge, les ions lithium rejoignent la cathode. En revanche, lors de la charge, seuls ceux présents dans l'électrolyte aqueux font le chemin inverse : mais il a été montré que le composé se formant lors de la décharge LiOH est soluble dans l'électrolyte aqueux. Cette disposition évite la corrosion et la dégradation de la cathode air lors de la charge.

La membrane utilisée par les Japonais est le LISICON.

Dans l'article de la revue *Nature* déjà cité, le professeur Tarascon évoque une autre voie de recherche : l'utilisation d'une cathode formée de nanomatériaux permettrait d'améliorer sa capacité et de s'affranchir des problèmes de colmatage liés à l'apparition de Li_2O_2 . Par ailleurs, l'emploi d'électrolytes ioniques pourrait constituer une barrière contre les molécules d'eau.

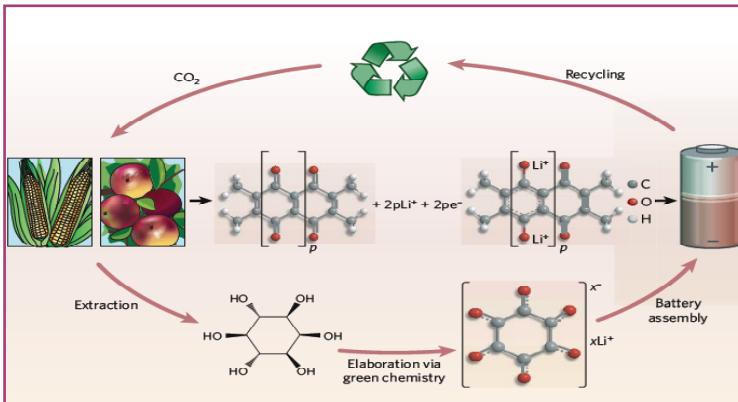
Si tous les experts se rejoignent pour souligner l'immense intérêt que revêt la mise au point des batteries lithium-air, ils convergent également pour en souligner les difficultés. Ce type d'accumulateurs constitue une piste prometteuse, mais sa mise en service commerciale ne peut être espérée avant dix ou vingt ans.

Les batteries organiques

À la fin de l'article précité, Michel Armand et Jean-Marie Tarascon s'interrogent sur la possibilité d'utiliser à plus long terme des matériaux organiques naturels pour mettre au point de nouvelles batteries. Ils évoquent ainsi la possibilité d'employer des molécules organiques, $\text{Li}_x\text{C}_6\text{O}_6$, issues de sucres naturels que l'on trouve dans les organismes vivants, en particulier dans le maïs, et de transformer par polycondensation l'acide malique contenu dans les pommes en un matériau appelé polyquinone, actif vis-à-vis du lithium.

Ils soulignent cependant que les matériaux organiques présentent de sérieux inconvénients en termes de stabilité thermique et de solubilité dans les électrolytes et qu'ils correspondent à une faible densité d'énergie, ce qui limite leur utilisation dans les transports.

Un futur < organique >



Source : Armand M. et Tarascon J.-M. (2010), op. cit.

3 ■ S'agissant des matières premières, les contraintes tiennent plus à la géopolitiques qu'à l'état des ressources

Le choix technologique des batteries et plus largement le développement de la filière des véhicules électriques ou hybrides supposent l'identification des ressources et des contraintes sur les matières premières. Le lithium, candidat présent, a fait l'objet de nombreux débats, notamment sur sa rareté. Mais d'autres problèmes peuvent survenir, et pas seulement relatifs à cette matière première.

3.1. Approvisionnement en lithium : des tensions possibles à court-moyen terme, le temps que l'offre s'adapte à la demande

Utilisation actuelle et demande future

La demande de lithium a fortement augmenté ces dernières années, une croissance en partie imputable à l'essor des batteries rechargeables pour matériel électronique (90 % des ordinateurs et téléphones portables sont équipés d'une batterie au lithium). En 2008, les batteries représentaient 27 % de la demande mondiale. Mais le lithium a d'autres utilisations : verres et céramiques (17 %), lubrifiants (12 %), pharmacie et chimie (8 %), etc.

Depuis quelques années, la principale utilisation du lithium réside dans la fabrication des batteries. Cette demande devrait encore s'accroître, en

raison du développement des véhicules et bicyclettes électriques. En effet, les constructeurs automobiles semblent, pour la plupart, s'orienter vers la technologie lithium-ion, ce qui laisse présager une pression croissante sur les ressources en lithium.

Aujourd'hui, on estime qu'une batterie pour un VE demande environ 3 kg de lithium, contre 600 g pour un VHR¹. Si on fait l'hypothèse que le parc en 2020 sera constitué de quelque 10 millions de VE, les besoins en lithium s'élèveraient alors à environ 30 000 tonnes par an, soit légèrement plus que la production de 2008 (27 000 tonnes). Cela signifie-t-il pour autant que le lithium viendra à manquer ?

Des ressources et réserves abondantes mais concentrées

L'estimation des ressources varie entre 11,4 millions de tonnes (US Geological Survey, USGS, organisme gouvernemental américain qui se consacre à l'étude des sciences de la Terre) et 56 millions (Sociedad Química y Minera de Chile, SQM). Les réserves mondiales de lithium (ressources exploitables dans les conditions économiques, environnementales, réglementaires et sociales actuelles) sont estimées à 4,4 millions de tonnes par l'USGS (soit 40 % des ressources), chiffre qui pourrait fortement progresser dans les prochaines années selon le Bureau de recherches géologiques et minières (BRGM) car il reste de nombreuses possibilités de trouver de nouveaux gisements. En outre, certains pays produisent du lithium sans que leurs réserves soient répertoriées : c'est le cas de l'Argentine et, dans une moindre mesure, du Portugal. Les réserves prises en compte par l'USGS sont localisées à 68 % dans les lacs salés du Chili. La Chine se place en seconde position avec 12 % des réserves, suivie de la Bolivie avec 7 %. Pour ce pays, actuellement premier en termes de ressources, l'estimation des réserves est très incomplète et le chiffre annoncé est à considérer comme un minimum² (*voir graphique suivant*). Les réserves répertoriées aujourd'hui représentent 160 ans de consommation actuelle et environ 60 % des ressources ne sont pas comptabilisées en réserves.

Les ressources exploitables (autrement dit, les réserves) dépendront fortement des prix, comme pour toute matière première. Si les « salars » (« déserts de sel ») sont des espaces d'exploitation peu coûteux (*modulo* la construction d'infrastructures de transport), le lithium peut se trouver sous d'autres formes : argile (Nevada), saumure géothermale, etc.

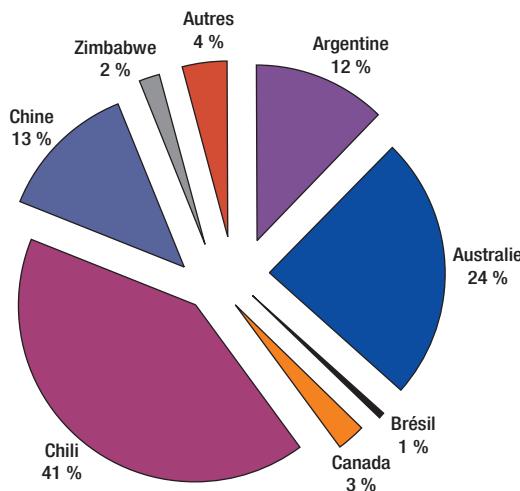
[1] De Guibert A. (2010), Présentation au Colloque IFP Panorama, Saft, 28 janvier.

[2] IFP (2010), « Li, Ni, Pt, Pd : des métaux “critiques” ? », *Panorama 2010*.

Une production insuffisamment diversifiée

Aujourd’hui, la production est concentrée dans quelques pays où l’exploitation est économiquement viable. Le lithium est souvent exploité sous sa forme chlorure (LiCl), présent dans les saumures des lacs salés intracontinentaux¹. Les salars andins et le lac salé Qinghai au Tibet sont les plus gros gisements exploités aujourd’hui, pour la bonne raison qu’ils sont les plus rentables².

Production de lithium en 2009



Source : IFP Énergies nouvelles

Avant tout, un problème d'accès à la ressource

Si le lithium fait parler de lui, c'est que sa production est aujourd'hui dans les mains d'un nombre restreint d'acteurs : SQM, qui représente 30 % de la production mondiale et est basée au Chili ; Chemetall, avec 28 % des parts de marché et des opérations localisées au Chili et aux États-Unis, où il est le seul

[1] IFP [2010], *op. cit.*

[2] On trouve également du lithium sous forme de silicates aux États-Unis, au Canada, en Russie, en Chine ou encore en Australie : contrairement aux gisements de surface, ces silicates s'exploitent le plus souvent dans de grandes mines à ciel ouvert ou souterraines, avec des opérations de lavage, ce qui rend ce lithium plus coûteux que celui des salars.

producteur ; et enfin FMC, avec 19 % des parts de marché et des opérations en Argentine.

Plus inquiétant, les réserves exploitables à l'avenir sont concentrées dans une poignée de pays, souvent difficiles d'accès pour les entreprises étrangères. Ainsi, le convoité gisement bolivien de l'Uyuni reste très protégé par le président Evo Morales, qui souhaite garder le contrôle sur ces ressources. L'exploitation du lithium dans cette région pauvre pourrait contribuer au développement économique local, créant des emplois et des infrastructures. Le président bolivien résiste pour le moment aux diverses propositions faites par Bolloré et Eramet, ou par les japonais Mitsubishi et Sumitomo et le coréen LG¹, mais le gouvernement semble éprouver des difficultés à mobiliser les 800 millions de dollars nécessaires à la construction des mines et de l'usine de traitement². D'autres ressources ont récemment été découvertes en Afghanistan.

Cet accès limité à la ressource pose des problèmes d'approvisionnement qui tirent les prix vers le haut. Ainsi, le prix de la tonne de carbonate de lithium a presque doublé depuis 2006, son pic ayant culminé à 6 000 dollars en moyenne en 2009. Étant donné le petit nombre d'acteurs, les prix sont fixés par les producteurs. Il n'existe pas de cotations internationales. Les transactions se font pour la plupart sur les marchés de gré à gré (marchés non contrôlés), ce qui explique le manque de visibilité et de transparence sur la formation des prix.

Ces problèmes d'accès à la source pousseront peut-être des agents économiques, à l'instar de Toyota en Argentine, à sécuriser leurs approvisionnements en prenant des participations dans les gisements de lithium.

L'augmentation des prix sera une incitation à l'exploration et à la mise en production de gisements jusque-là considérés comme non rentables. Le lithium n'ayant pas encore fait l'objet d'une prospection intense dans le monde, il y a toutes chances que l'offre puisse satisfaire la demande après une période d'adaptation.

Des investissements nécessaires dès aujourd'hui

L'offre de lithium est contrainte par les durées de mise en exploitation des gisements. La connaissance du terrain, une opération souvent coûteuse, est laissée à la charge des gouvernements. Les problèmes d'acceptabilité sociale, mais encore de financement, constituent des freins importants à l'exploitation.

[1] *Les Echos* (2010), « Bolloré et Eramet vont chercher du lithium en Argentine », 17 février.

[2] Bloomberg (2009), « Lithium for 4.8 billion electric cars lets Bolivia upset market », 7 décembre.

C'est pourquoi cinq ans au minimum sont nécessaires pour une production à plein régime¹. L'adéquation entre l'offre et la demande pourrait donc poser problème d'ici 2017-2018.

Problèmes environnementaux ?

Mines à ciel ouvert ou grands bassins d'évaporation, l'exploitation du lithium dans des zones encore préservées n'est pas sans rappeler les champs de pétrole non conventionnel au Canada. Si le lithium devient la nouvelle « ressource phare » de la filière automobile, certaines régions pourraient subir le revers écologique d'une exploitation massive.

3.2. Inquiétudes concernant d'autres matériaux ou métaux

Cette dimension géopolitique n'est pas propre au lithium ; elle est caractéristique de l'ensemble des matières premières et conditionne les stratégies de développement de l'industrie. S'agissant des batteries, la moitié des ressources de cobalt se trouverait en République démocratique du Congo. Le gouvernement et les forces rebelles ont été accusés de détournement des revenus liés à la vente de métaux dans le but de financer des opérations opaques. La hausse considérable du prix du cobalt et sa volatilité ont conduit les fabricants de batteries à réduire les quantités de ce composant.

Le nickel devrait voir sa consommation augmenter avec l'accroissement de la part de marché des véhicules hybrides. Une batterie nickel-hydrure métallique consomme entre 1 et 2 kg de nickel par kWh. D'après l'IFP Énergies Nouvelles, mettre sur le marché un million de véhicules équivalents à la Toyota Prius requiert de produire environ 3 000 tonnes de nickel supplémentaires, soit 0,2 % de la production actuelle. Étant donné les perspectives actuelles de développements miniers dans le domaine, ceci ne devrait pas créer de tensions majeures.

Le cuivre peut également poser problème. Métal très utilisé aujourd'hui dans les circuits électriques, il semble pour le moment préservé des ruptures d'approvisionnement. Pourtant, les tensions sur le marché pourraient être importantes à l'avenir. Aujourd'hui, une voiture utilise 20 à 25 kg de cuivre ; demain, si elle passe au moteur électrique, elle en utilisera le double.

[1] Présentation de A. de Guibert (Saft) au Colloque IFP Panorama, *op. cit.*

La criticité de ces métaux sera conditionnée par l'amélioration des connaissances géologiques, par la possibilité d'exploiter les ressources et par la poursuite des efforts visant à réduire les quantités de matières requises pour leurs différentes applications.

Les perspectives de croissance des batteries électriques, notamment pour les voitures, laissent penser que les marchés seront plus tendus demain qu'aujourd'hui. Les contraintes pesant sur ces secteurs pourraient se révéler encore plus fortes si les pressions environnementales s'accentuent. Car les procédés de transformation du matériau brut en composant utilisable demandent de l'énergie et de l'eau en grande quantité.

3.3. Le monopole chinois sur la fourniture des terres rares

Les terres rares regroupent 17 éléments de la classification périodique aux propriétés voisines. Elles sont très utilisées dans toutes sortes d'appareils électroniques (téléphones portables, écrans à cristaux liquides, tablettes tactiles), dans les technologies « vertes » (panneaux solaires), mais aussi dans l'industrie de la défense (missiles de croisière, radars, etc.). Elles constituent également un élément indispensable du véhicule électrique. Le lanthane est présent dans la cathode des batteries Ni-MH utilisée dans les VHR. Le néodyme, souvent couplé au praséodyme, est un élément essentiel dans la fabrication d'aimants permanents, fréquemment utilisé dans les moteurs électriques. Certaines recherches sont en cours pour tenter de fabriquer des aimants permanents à partir d'autres matériaux que les terres rares, mais pour le moment aucune piste sérieuse ne s'est dégagée. L'utilisation d'aimants ferrites constitue néanmoins une alternative qui pourrait diminuer les rendements des moteurs. Renault développe en outre des moteurs à rotor bobiné qui épargnent le recours aux terres rares.

Les terres rares sont également utilisées pour la fabrication de l'électronique de puissance (véhicules électriques et hybrides) ainsi que pour des systèmes d'échappement (moteur thermique).

L'approvisionnement en terres rares pourrait devenir problématique dans les quelques années à venir. La Chine possède environ 35 % des réserves totales (dont 60 % pour ses besoins intérieurs) et représente plus de 95 % de la demande mondiale¹. Elle fournit l'ensemble des besoins en néodyme qui, d'après les statistiques chinoises, s'élèvent à environ 16 000 tonnes (en 2005)

[1] *The Economist* (2010), « Rare earths and China: Dirty business », 2 octobre.

et elle semble vouloir utiliser sa position comme un outil de politique industrielle. Des tensions sont d'ores et déjà intervenues entre la Chine et le Japon. Celui-ci a récemment accusé le gouvernement chinois d'avoir utilisé ses terres rares comme moyen de pression contre l'arrestation de ses pêcheurs sur les eaux territoriales japonaises, en bloquant ses exportations.

Si la Chine est devenue en quelques années le leader sur le marché, c'est que ses prix défaient toute concurrence. D'autres raisons expliquent aujourd'hui qu'elle soit en position de monopole. L'extraction des terres rares demande des procédés de séparation et de valorisation très capitalistiques et souvent nocifs pour l'environnement. Une même mine regroupe divers matériaux : leur séparation permet d'obtenir différentes terres rares, mais également des matériaux radioactifs, comme l'uranium. Ceci explique la disparition des concurrents étrangers, mais également du savoir-faire. La France est l'un des seuls pays au monde avec la Chine à posséder encore des techniques de séparation pouvant répondre à la demande. L'acquisition de ces techniques pourrait nécessiter une décennie.

Les ressources en terres rares ne se limitent pas au seul territoire chinois. L'Australie, la Californie, le Canada ou encore l'Inde et le Vietnam commencent à investir ou réinvestir dans ces mines, à des stades plus ou moins avancés. Mais il faudra quelques années avant que la Chine perde son monopole sur le secteur.

Pour résumer, le développement des batteries du futur n'est pas subordonné à l'existence de ressources des métaux mais plutôt à l'accès à ces ressources. Ce problème est commun à plusieurs matériaux, pour lesquels la demande pourrait fortement augmenter avec le développement des VE ou VHR. En effet, la plupart des gisements exploitables à bas coûts de lithium ou encore de cobalt se trouvent dans des zones sensibles au plan politique. Pour échapper à cette situation, des investissements sont nécessaires et ils n'auront leur plein effet que quelques années plus tard. Il peut en résulter des tensions sur les marchés et donc des prix plus élevés. Mais le poids du lithium, du cobalt ou du nickel dans le coût des batteries et moteurs électriques est relativement faible. Ces deux problèmes sont particulièrement exacerbés dans le cas des terres rares, car celles-ci se trouvent dans les mains d'un seul et unique producteur, la Chine, qui a d'ores et déjà annoncé qu'elle privilégierait son propre marché. Si ces mines sont capitalistiques, elles demandent aussi un savoir-faire que la plupart ont abandonné et qu'il faut développer à nouveau.

4 ■ Le recyclage des batteries lithium-ion est possible techniquement mais non rentable actuellement

Le recyclage des déchets est communément motivé par des considérations d'ordre environnemental (préservation des ressources et réduction de la pollution), économique (diminution du coût de production), géopolitique (indépendance et sécurité des approvisionnements en matières premières) ou social (meilleure acceptabilité sociétale). Dans le cas des batteries lithium-ion, la forte concentration géographique de la production de lithium¹ combinée aux effets néfastes reconnus des déchets de batteries sur l'environnement² fait prévaloir les arguments géopolitiques et environnementaux, faisant du recyclage de ces batteries un enjeu important pour le développement à grande échelle de la mobilité électrique. À l'heure actuelle, la rentabilité incertaine de l'opération et l'absence de réglementation réellement contraignante ne favorisent pas la généralisation du processus, d'autant que le marché du véhicule hybride ou électrique est encore immature. Toutefois, quelques acteurs de l'industrie automobile ou du recyclage, anticipant des évolutions positives de ce marché³, se positionnent dès aujourd'hui sur ce secteur.

4.1. Les techniques de recyclage des batteries lithium-ion : entre voie thermique et voie chimique

Le développement massif de l'utilisation des batteries lithium-ion dans le secteur de l'électronique portable et portative a permis d'améliorer de manière significative les possibilités de recyclage en stimulant les efforts de recherche. Les méthodes utilisées pour les premières batteries au lithium consistaient à les désactiver puis à s'en débarrasser dans des décharges publiques (pour enfouissement ou incinération) : les composants n'étaient pas récupérés, principalement en raison de la grande réactivité du lithium à l'eau et à l'air, mal maîtrisée au début. L'entreprise Sony, une des premières à commercialiser ce type de batteries, en collaboration avec Sumitomo Metals and Mining Co., a fait œuvre de pionnière en réussissant à surmonter ces difficultés initiales. D'autres, comme l'américain Toxco ou le français Recupyl, ont par la suite développé des procédés brevetés permettant des taux de récupération des

[1] Près de 70 % des gisements de lithium se trouvent en Amérique du Sud (Argentine, Bolivie, Chili).

[2] Ces effets sont principalement liés aux composants suivants : les métaux lourds présents dans la cathode ; les sels conducteurs à base de fluor, d'arsenic, ou de composés sulfonés ; les solvants organiques ; le lithium, métal alcalin très réactif.

[3] Ces acteurs escomptent une forte croissance du nombre de batteries lithium-ion en fin de vie grâce au développement de l'utilisation des véhicules hybrides ou électriques et à des réglementations de plus en plus contraignantes pour le recyclage des batteries.

matériaux très satisfaisants. En dépit de ces avancées, le marché du recyclage des batteries lithium-ion reste concentré entre les mains d'un nombre réduit d'acteurs, ce qui s'explique là encore par la grande réactivité du lithium : la plupart des procédés de recyclage en sont au stade pilote ou font l'objet d'études en laboratoire et très peu existent aujourd'hui à l'échelle commerciale. Sous réserve de mesures de précaution et de protection appropriées, ces techniques de recyclage sont applicables aux batteries lithium-ion des véhicules hybrides et électriques. Une poignée d'acteurs, pour la plupart chefs de file dans le domaine du recyclage des déchets électroniques, prévoient aujourd'hui de construire des usines pilotes capables de recycler ces batteries.

En matière de procédés de recyclage, on distingue principalement la voie thermique et la voie chimique¹. La première met en œuvre un procédé pyrométallurgique à haute température (1 000-1 500 °C) qui entraîne l'évaporation de l'électrolyte et conduit à la formation d'un alliage de cuivre, fer, manganèse, nickel et cobalt. Cette étape permet de valoriser le potentiel énergétique des éléments plastiques et des composés inorganiques (autres que le graphite) en utilisant leurs capacités calorifiques. De même, le graphite contenu dans l'électrode sert d'agent réducteur pour transformer les oxydes métalliques en leur forme métallique. L'alliage obtenu est ensuite traité pour récupérer séparément le nickel (sous forme d'hydroxydes de nickel), le cobalt (sous forme d'oxydes de cobalt) et les autres métaux comme sous-produits. Le lithium, contenu dans une scorie d'aluminate de calcium, n'est pas transformé en métal. Ce procédé est utilisé par Umicore, un des champions mondiaux du recyclage des produits électroniques. Depuis janvier 2004, l'entreprise belge recycle à l'échelle commerciale, dans son usine en Suède, des batteries lithium-ion provenant d'appareils électroniques portables : le nickel, le cobalt et la plupart des métaux récupérés sont réutilisés pour la production de nouvelles batteries et l'aluminate de calcium, contenant le lithium, sert dans la fabrication du ciment. Umicore prétend détenir la technologie pour recycler le lithium en boucle fermée, c'est-à-dire en réutilisant le lithium extrait dans de nouvelles batteries. Elle prévoit de construire à Anvers une usine pilote de recyclage de batteries de véhicules hybrides et électriques d'une capacité totale de 7 000 tonnes : elle devrait être opérationnelle en mai 2011 mais ne valorisera pas le lithium pour des raisons de rentabilité.

[1] Il s'agit des procédés de recyclage des batteries d'appareils électroniques portables les plus utilisés à l'échelle industrielle.

La voie chimique utilise une série de traitements chimiques (bains caustiques) pour récupérer les différents éléments. C'est le processus utilisé par Toxco Inc., entreprise américaine spécialisée dans le recyclage des batteries : après démontage du boîtier en plastique, les composants des batteries sont solidifiés dans de l'azote liquide à -196 °C pour désactiver le lithium, puis broyés. S'ensuit un processus de séparation qui permet d'extraire les sels de lithium, le cobalt, le nickel, le manganèse, ainsi que les autres éléments comme l'aluminium, le cuivre, l'acier, présents dans les batteries lithium-ion. Le cobalt, le nickel et le manganèse récupérés serviront à la fabrication des cathodes de nouvelles batteries. Les sels de lithium sont séparés des fragments métalliques et plastiques résiduels puis l'ajout de carbonate de sodium aux solutions permet de précipiter le lithium sous forme de carbonate : le carbonate de lithium ainsi obtenu peut servir à la fabrication de lithium ou à la fabrication des électrolytes utilisés dans les batteries, assurant ainsi le recyclage en boucle fermée. Le plastique et le papier résiduels sont récupérés et jetés ou recyclés. Toxco Inc. possède une usine au Canada qui recycle les batteries lithium-ion des téléphones et des ordinateurs portables mais également des batteries lithium-ion de taille bien plus conséquente à l'exemple des batteries utilisées dans des applications militaires comme le missile Minuteman. Cette usine recyclerait également les batteries de la marque de voiture électrique Tesla Motors. Plus récemment, l'entreprise californienne aurait créé une filiale de conversion du carbonate de lithium en électrolytes pour les batteries au lithium. La société, qui a reçu une subvention de 9,5 millions de dollars du ministère de l'Énergie américain, projette de construire à Lancaster (Ohio), une usine pilote d'une capacité d'environ 4 000 tonnes afin de recycler en boucle fermée les batteries lithium-ion de véhicules hybrides et électriques. L'installation intégrera également les équipements nécessaires à la transformation et la réorientation des batteries de véhicules électriques en fin de vie vers d'autres usages.

La méthode thermique permettrait un meilleur taux de valorisation (86 % de la batterie et 100 % des métaux sont recyclés) que la méthode chimique (respectivement 68 % et 98 %) mais supposerait également une dépense en énergie bien plus forte, les matériaux devant être chauffés à des températures élevées.

4.2. Les principaux déterminants de la rentabilité économique

En ce qui concerne les batteries lithium-ion de première génération utilisées dans les appareils portables, les industriels ont réussi à développer une filière

dont la rentabilité est assurée par le cobalt présent dans les cathodes des batteries, la technologie lithium-cobalt équipant la plupart de ces batteries. La situation est un peu différente pour les batteries des véhicules électriques et hybrides rechargeables : en fonction de la chimie lithium-ion utilisée, les métaux à récupérer peuvent être présents en trop faible quantité ou n'être pas assez chers pour assurer un recyclage vraiment rentable.

Aujourd'hui, l'élément le plus significatif en termes de prix et de poids est effectivement le cobalt, métal rare et précieux dont le recyclage est rentable. Or, précisément, en raison de ce prix élevé mais aussi des problèmes de sécurité¹ qu'il pose, le cobalt pourrait être progressivement abandonné au profit de solutions moins coûteuses et plus sûres comme le phosphate de fer pour la constitution des cathodes des batteries de véhicules hybrides et électriques. Ainsi, le lithium, qui n'est actuellement pas recyclé, sera un élément de plus en plus déterminant pour la rentabilité du recyclage. Son prix, qui était en augmentation constante depuis quelques années, s'est aujourd'hui stabilisé à un bas niveau, principalement à cause de la récession économique mondiale, responsable d'une surproduction de lithium. Mais cette situation devrait évoluer. Selon Jan Vliegen, vice-président d'Umicore, pour que son recyclage soit rentable, le carbonate de lithium devrait atteindre un prix de marché de 10-15 \$/kg, au lieu de 6-7 \$/kg actuellement. Une telle hausse des prix aurait l'avantage d'assurer un recyclage rentable des batteries sans toutefois augmenter de manière significative leur coût de fabrication, en raison de la faible quantité de lithium qu'elles contiennent².

L'impact des réglementations des pouvoirs publics sur le recyclage des batteries lithium-ion est également important. En imposant le recyclage de ces batteries à des taux élevés, même lorsqu'il n'est pas rentable, les autorités publiques pousseraient à une industrialisation véritable de la filière du recyclage comme ce fut le cas pour les batteries au plomb. Elles pourraient aussi jouer un rôle appréciable dans la chaîne du recyclage en définissant et optimisant les procédés de collecte, ce qui augmenterait le taux de retour des batteries usagées. À l'échelle européenne, par exemple, des réglementations de ce type existent mais ne sont pas assez exigeantes pour encourager l'essor d'une filière de recyclage des batteries au lithium. En effet, la directive européenne 2006/66/CE relative à l'élimination des

[1] Les tensions géopolitiques en République démocratique du Congo, qui représente plus de 50 % de la production mondiale de cobalt, sont aussi évoquées pour expliquer son remplacement futur.

[2] Le lithium représente moins de 3 % du coût de production d'une batterie.

piles et accumulateurs usagés a pour priorité la réduction des substances dangereuses¹, notamment le mercure, le cadmium et le plomb, et ne traite pas spécifiquement du lithium. Elle fixe également pour les États membres des règles pour la collecte et le recyclage : les taux de collecte des déchets de piles et accumulateurs devront atteindre 25 % en 2012 et 45 % en 2016 et les taux de recyclage au moins 50 % de leur poids moyen en 2011 (les piles et accumulateurs plomb-acide ou nickel-cadmium sont soumis à des taux plus élevés, respectivement 65 % et 75 %).

Ainsi, l'argument économique est aujourd'hui le seul obstacle véritable au recyclage systématique et en boucle fermée des batteries au lithium. Le renchérissement des prix du lithium, prévu pour un avenir proche, permettrait de rentabiliser cette opération. D'ici là, en fonction de la chimie lithium-ion utilisée, les éléments constitutifs des batteries, comme le cobalt et le nickel, pourront selon les cas assurer le recyclage en boucle ouverte du lithium et seuls les produits les plus rentables seront recyclés. Dans l'éventualité d'un fort développement du marché des batteries lithium-ion pour les véhicules hybrides et électriques, des incertitudes demeurent sur la possibilité d'un recyclage efficace à grande échelle. Outre les considérations économiques, notamment sur le prix du lithium, il existe des incertitudes techniques : on ne peut aujourd'hui garantir la performance des technologies de recyclage à l'échelle industrielle. Il faudra également assurer la réalisation des investissements nécessaires à la mise en place d'infrastructures de recyclage de capacité suffisante.

5 ■ La compétition industrielle est dominée par les pays asiatiques

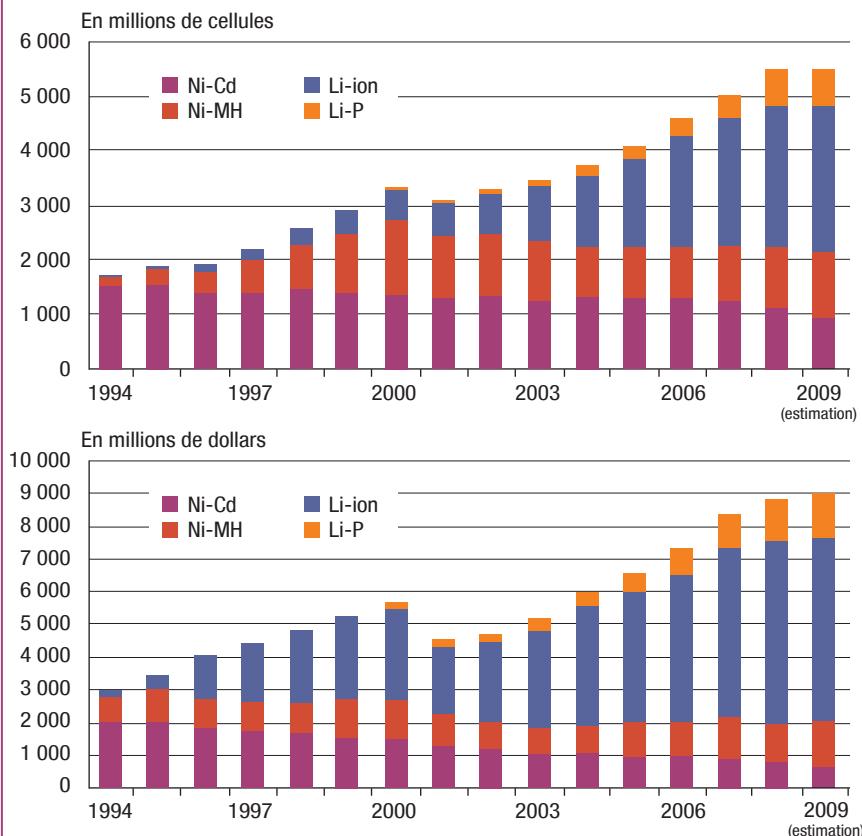
Le développement des batteries lithium-ion et des accumulateurs nickel-hydride métallique a pris au dépourvu au début des années 1990 l'ensemble des fabricants traditionnels. La surprise est venue de Sony, qui n'était pas à l'origine un fabricant de batteries : c'est grâce à un effort de recherche considérable mené durant les années 1980 que l'entreprise japonaise a pu mettre sur le marché la première batterie au lithium en 1991. Ce développement a naturellement bénéficié de la très large diffusion du téléphone portable.

[1] Cette directive interdit la mise sur le marché de la plupart des piles et accumulateurs contenant une certaine quantité de mercure ou de cadmium et impose le marquage visible sur les piles, accumulateurs et assemblages en batterie des symboles chimiques Hg, Cd et Pb lorsqu'ils contiennent plus de 0,0005 % de mercure, plus de 0,002 % de cadmium ou plus de 0,004 % de plomb.

5.1. Le marché actuel des accumulateurs est dominé par les pays asiatiques

En 2000, le marché des accumulateurs lithium-ion était dominé à plus de 95 % par le Japon : trois constructeurs (Sony, Sanyo, Matsushita) le détenaient à plus de 70 %. À cette date, la production mondiale d'accumulateurs nickel-hydrure métallique (1 300 millions de batteries¹) prévalait largement sur le lithium-ion (500 millions).

⌚ Vente des batteries rechargeables dans le monde, 1994-2008



[1] Le terme batterie recouvre à la fois la notion de pile et d'accumulateur : cependant, la technologie nickel métal hydrure est quasiment uniquement utilisée sous forme d'accumulateur.

Les graphiques précédents illustrent l'évolution des ventes des batteries rechargeables de 1994 à 2008 : ils montrent le déclin progressif du nickel-cadmium, le développement considérable des batteries lithium-ion à partir des années 2000, la croissance de 1995 à 2000 du nickel-hydrure métallique, puis sa relative stagnation devant la concurrence du lithium. Selon Avicenne, 70 % des batteries nickel-hydrure métallique vendues en 2015 seraient destinées à des hybrides rechargeables. À cette date, le lithium-ion ne représenterait que 10 % environ du marché du véhicule hybride.

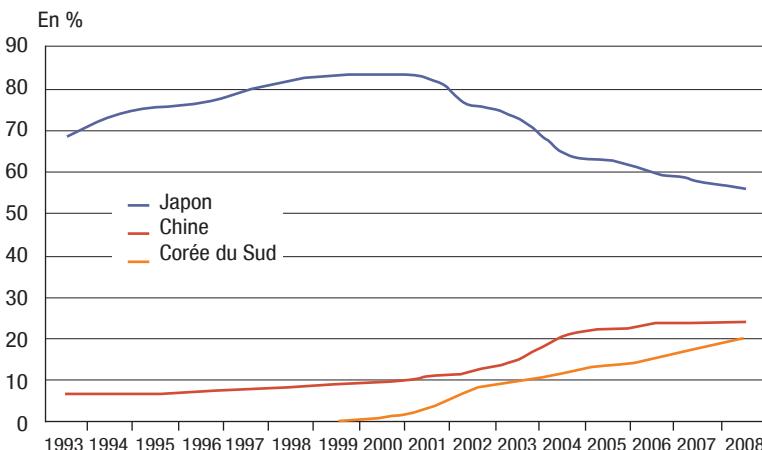
Aujourd'hui, le marché de la batterie rechargeable est dominé (de manière écrasante) par les constructeurs de trois pays :

- le Japon : 56 % des ventes en 2008, soit 5,1 milliards de dollars ;
- la Chine : 23 % des ventes en 2008, soit 2,3 milliards de dollars ;
- la Corée : 20 % des ventes, soit 1,8 milliard de dollars.

Les constructeurs des autres pays se partageraient moins de 100 millions de dollars. La principale évolution en cours est l'augmentation de la part de la Chine dans les prochaines années, dans la mesure où ses usines fabriquent (à un coût relativement faible) de plus en plus de batteries pour des sociétés japonaises.



Le marché de la batterie rechargeable, par pays et en pourcentage, 1993-2008



Source : Avicenne (2009), The Rechargeable Battery Market 2008-2009, septembre

5.2. Les batteries du futur donnent lieu à de vastes programmes de recherche, notamment au Japon

En 2008, le METI (ministère de l'Économie, du Commerce et de l'Industrie japonais) a annoncé que « la simple amélioration des techniques actuelles n'était pas suffisante et qu'il fallait explorer des voies nouvelles pour concevoir des accumulateurs électriques utilisant de nouveaux matériaux ». Pour stimuler la recherche fondamentale en matière de stockage électrique, la NEDO (Organisation pour le développement des énergies nouvelles et des technologies industrielles, une agence de financement de la R & D sous tutelle du METI) soutient un consortium de 22 organismes qui doivent collaborer sur ce sujet. Le projet, qui a débuté en 2009, est piloté par l'université de Kyoto. Il vise à développer d'ici 2013 une batterie rechargeable d'une densité énergétique trois fois supérieure aux modèles existants. Cette date ne représente qu'une étape. L'enjeu pour le Japon est de conserver son avance technologique dans le domaine des accumulateurs.

5.3. Aux États-Unis, les programmes de recherche s'accompagnent d'aides financières à l'industrie

Plus que par les montants financiers mis en jeu – impressionnantes – ou par l'organisation de la recherche, l'intérêt des États-Unis pour le développement des véhicules électriques et des batteries peut se mesurer par le nombre de ministres impliqués dans les aides distribuées aux industriels. Le 9 août 2009, non seulement le président américain mais aussi son vice-président et trois ministres, les secrétaires d'État à l'énergie, aux transports et au commerce, se sont déplacés, chacun sur un site industriel différent, pour annoncer des aides financières à ce secteur.

Premier et principal objectif : réduire la dépendance pétrolière. Dans le domaine des batteries, ceci conduit le DOE (Department of Energy) à encourager par des aides financières extrêmement importantes la recherche mais aussi la mise en place des usines de fabrication correspondantes. L'objectif est simple : fabriquer 40 % des batteries pour les véhicules hybrides et électriques d'ici cinq ans dans un marché essentiellement dominé par les constructeurs asiatiques. Dans le cadre d'un programme du DOE¹, Nissan USA a ainsi reçu le plus gros prêt consenti à un constructeur étranger à ce jour aux États-Unis, soit 1,6 milliard de dollars, pour réaménager et moderniser son usine de fabrication de la Leaf et de ses batteries. Dans le cadre des plans de relance,

[1] DOE Advanced Technology Vehicles Manufacturing Program.

le gouvernement américain a mis en place, en août 2009, un programme de prêts, destiné à des industriels situés aux États-Unis et crédité de 2,4 milliards de dollars¹. Quarante-huit projets ont ainsi été distingués.

Comme au Japon, les recherches font l'objet d'une organisation rigoureuse guidée par un certain nombre de laboratoires prestigieux : le DOE procède comme d'habitude par grands programmes de recherche ciblés sur une ou plusieurs thématiques spécifiques. Un premier sujet portant sur l'utilisation de batteries lithium-ion dans les applications de forte puissance pour véhicules hybrides (non rechargeables) a été mené jusqu'en 2008 : le Département considère que la technologie des batteries lithium-ion a atteint, dans ce domaine, un niveau de développement suffisant pour être commercialisée. Elle correspond à une utilisation des batteries caractérisée par un très grand nombre de cycles portant sur une faible plage de la capacité (sans décharge profonde). Depuis le premier octobre 2008, un nouveau programme a été lancé sous le pilotage du Laboratoire national d'Argonne (Chicago) : il porte cette fois sur l'utilisation de batteries de haute énergie pour les véhicules hybrides rechargeables. Les barrières technologiques à atteindre concernent la densité d'énergie et l'énergie spécifique d'une batterie lithium-ion. Leur résolution doit, pour un véhicule de milieu de gamme et dans des conditions de volume et de masse raisonnables, permettre de couvrir une distance de 40 miles (en électrique) et d'assurer 3 000 à 5 000 cycles de charge/décharge profonde. En parallèle, des recherches plus fondamentales sont menées sur la chimie et sur les matériaux des batteries lithium-ion. Ce programme, appelé *Batteries for Advanced Transportation Technologies (BATT)*, est dirigé par le Lawrence Berkeley National Laboratory. Il implique également les laboratoires d'Argonne, du Brookhaven, d'Oak Ridge ainsi que le National Renewable Energy Laboratory².

Conclusion : la nécessité d'un saut technologique

A) Si l'autonomie des véhicules électriques munis de batteries au plomb, au nickel cadmium ou au nickel-hydrure métallique se limite à quelques

[1] 1,5 milliard de dollars pour fabriquer des batteries ainsi que leurs composants et pour accroître les capacités de recyclage ; 500 millions pour produire des composants pour véhicules électriques ; 400 millions pour acheter des milliers de véhicules électriques (hybrides rechargeables ou tout électriques) afin de les tester dans plusieurs dizaines d'endroits, pour installer des infrastructures de recharge et pour financer des formations destinées à accompagner la transition vers de nouveaux systèmes électriques de transport.

[2] Pour plus de détails, le lecteur peut se référer au rapport annuel du DOE sur le programme de recherche et développement de stockage de l'énergie, ainsi qu'au rapport du Consulat général de France à San Francisco sur le véhicule électrique :

<http://frenchsciencesf.wordpress.com/2010/10/28/the-future-of-batteries-our-latest-report-in-french/>.

dizaines de kilomètres et en obère le développement, les accumulateurs au lithium représentent une catégorie en plein essor, comportant de nombreuses variantes, dont la plus importante est probablement le lithium-ion.

B) La sécurité des batteries est un élément clé et doit être garantie : si les premières batteries lithium-ion étaient sujettes à des risques d'incendie, voire d'explosion, il est désormais possible de s'en affranchir par des matériaux intrinsèquement sûrs et/ou par un système de gestion particulièrement rigoureux. La création d'une norme dans ce domaine (et de la certification correspondante) permettrait de garantir au consommateur qu'il achète un véhicule dont la batterie ne provoquera pas d'incendie dans des conditions normales et extrêmes d'utilisation. Cette norme devrait être rendue obligatoire, au moins dans un cadre européen.

C) Les systèmes lithium-ion actuels n'ont qu'une dizaine d'années. Leurs performances s'améliorent régulièrement mais il n'existe pas aujourd'hui une technologie meilleure que toutes les autres en termes de sécurité, d'autonomie, de puissance, de coût, de durée de vie et de rapidité de la recharge. Chacune des compositions répond à un certain nombre de critères, et conduira un fabricant à la retenir en fonction des utilisations qu'il envisage :

- le dioxyde de cobalt et de lithium, présent dans les téléphones mobiles et les ordinateurs portables, n'est quasiment pas utilisé pour les véhicules électriques (hormis par Tesla) compte tenu de son coût (et de sa réactivité) ;
- le NCA, $\text{Li}(\text{NiCoAl})\text{O}_2$, oxyde de nickel dopé avec de l'aluminium et du cobalt (15 %) présente une très bonne aptitude en termes de nombre de cycles possibles et de durée de vie. Son utilisation dans des applications professionnelles depuis plus de dix ans et aujourd'hui dans des véhicules hybrides montre qu'un système de gestion adapté de la batterie peut permettre de maîtriser les risques d'emballement thermique. Son coût est néanmoins relativement élevé ;
- le NMC, $\text{Li}(\text{NiMnCo})\text{O}_2$, avec 33 % de nickel, 33 % de manganèse et 33 % de cobalt, présente l'inconvénient d'utiliser de fortes quantités de cobalt : son coût est donc élevé. Il est ainsi peu utilisé pour les véhicules électriques ;
- le LiMn_2O_4 : l'électrode LiMn_2O_4 permet de limiter le risque d'emballement thermique. Son coût est relativement peu élevé mais sa durée de vie est faible. Signalons toutefois que le Laboratoire national d'Argonne a annoncé début 2011 la mise au point d'une cathode « riche en manganèse », moins

chère et plus sûre, qui présenterait une meilleure capacité et dont la durée de vie serait plus longue. Cette batterie améliorée équipe déjà la nouvelle Chevy Volt ;

- le LiFePO₄ permet également de limiter le risque d'emballement thermique pour un coût peu élevé. Il pourrait constituer un matériau idéal. Il souffre néanmoins de plusieurs inconvénients : sa durée de vie, bonne à température ambiante, semble dépendre de la pureté de sa composition et est donc sujette à interrogation même si certains soulignent qu'il peut présenter une excellente tenue au cyclage ; son énergie spécifique est relativement faible ; enfin, ses performances à basse température sont mauvaises ;
- le pari du lithium métal polymère réside notamment dans la possibilité de surmonter les problèmes associés à la formation de dendrites à la surface de l'anode au moment du rechargement (qui ont conduit, en 2005, à la faillite du canadien Avestor à la suite des incendies dans son usine de fabrication et chez son principal client dans le domaine des télécommunications) : la minimisation de la valeur de l'intensité locale grâce à une augmentation très forte de la surface de l'anode, qui se transforme ainsi en un film ultra-mince de quelques dizaines de microns d'épaisseur et de plusieurs centimètres de largeur, y contribue. Seule la mise en service des voitures correspondantes et en particulier de la Bluecar de Bolloré permettra de déterminer si les limitations constatées sur ce type de batteries à la fin des années 1990 ont pu être surmontées.

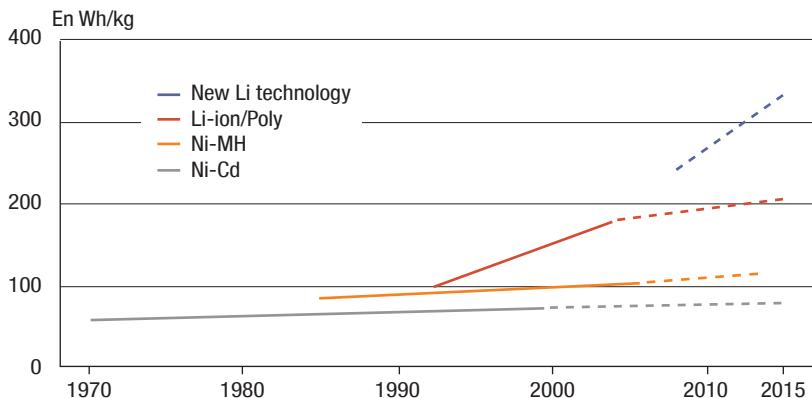
Les recherches sont donc très nombreuses : Patrick Pelata¹, directeur général de Renault, souligne que « les batteries ont encore un immense potentiel de progrès en coût, tant par l'effet volume que par l'amélioration d'un processus de production qui est encore bien loin de l'optimum... Ces progrès permettront la baisse du prix ou l'extension de l'autonomie, au choix ». À court terme, il est raisonnablement possible d'envisager une optimisation de la composition des matériaux de la cathode, qui améliorerait leur énergie spécifique de quelques pourcents. Il devrait également être possible de concevoir des accumulateurs (à partir notamment du titanate de lithium) autorisant, sans dommage pour ceux-ci, une charge rapide (de l'ordre de plusieurs dizaines de minutes). L'utilisation de telles batteries pourrait permettre d'envisager des trajets interurbains. Néanmoins, l'autonomie des véhicules électriques devrait rester durablement plafonnée au-dessous de 150 à 200 km. De façon plus précise, la NEDO retient dans sa feuille de route un objectif à 2020 de 250 Wh/kg pour

[1] Pélata P. [2010], « L'avenir de l'auto se construit dans la crise », *Sociétal*, n° 70 (4^e trimestre), p. 69-77.

l'énergie spécifique de l'anode, en ajoutant que cet objectif est proche de la limite atteignable par la simple amélioration des technologies nouvelles. Pour un véhicule dont la batterie pèserait 200 kg, et qui roulerait à 100 km/h¹, cela représenterait une autonomie d'environ 160 km.

Le graphique suivant, extrait d'un article paru dans le magazine *The Economist* de mars 2008, illustre les possibilités d'évolutions des capacités spécifiques des différents types de batteries et leurs limites (fixées aux environs de 300 Wh/kg à 2015).

⌚ Évolution des capacités spécifiques des différents types de batteries



Source : Avicenne, repris dans *The Economist* du 6 mars 2008

En outre, croire en la possibilité d'une recharge en cinq ou dix minutes serait une erreur, en l'état actuel des technologies².

D) Pour dépasser cette limite, un saut technologique est nécessaire. Il peut provenir de plusieurs technologies. L'utilisation du silicium pourrait permettre dans les trois à cinq ans une amélioration de l'autonomie d'environ 20 % (à condition de pouvoir garantir la stabilité morphologique de l'électrode dans la durée). Elle reste néanmoins à valider sur le plan industriel. Le développement des électrolytes solides, *a priori* intrinsèquement sûrs, pourrait également améliorer des performances des batteries, notamment en matière de vieillissement

[1] Avec une consommation des auxiliaires de 3 kWh (correspondant à des conditions hivernales sévères). Le calcul est effectué en prenant une masse d'éléments de 150 kg.

[2] Un changement de batterie est en revanche possible dans un tel délai.

et de puissance spécifique (grâce en particulier à l'utilisation d'un packaging métaloplastique). Il constitue en outre une étape possible dans la mise au point des technologies lithium-nickel et lithium-air. Cette dernière améliorerait considérablement l'autonomie du véhicule et pourrait permettre de concevoir des distances de l'ordre de 500 kilomètres. Mais elle demande encore des développements scientifiques puis une mise au point industrielle qu'il n'est guère possible d'envisager, selon les chercheurs, avant au moins une dizaine, voire une vingtaine d'années.

E) Les batteries nickel-hydrure métallique devraient rester majoritaires sur le marché destiné aux véhicules hybrides non rechargeables tant que leur prix restera plus faible que celui des lithium-ion. Si le nombre de cycles de charge/décharge complets qu'elles peuvent supporter est faible (supérieur à 1 000 cycles aujourd'hui), leur durée de vie est en revanche très importante si on ne les décharge pas complètement. Toyota annonce ainsi des durées de vie de l'ordre de 600 000 km sur le pack d'une batterie de Prius. Cette technologie pourrait cependant être concurrencée, dans le futur, par les accumulateurs lithium-ion, si le prix de ces derniers venait à diminuer et s'ils parvenaient à des performances de fiabilité et de durée de vie comparables.

F) Une utilisation optimale des batteries suppose de les faire fonctionner dans des conditions étudiées dès la conception du véhicule et probablement de l'adapter en fonction des performances des accumulateurs :

- l'allègement de la masse, l'amélioration du coefficient de résistance à l'air, la diminution de l'énergie consommée par les auxiliaires vont réduire la quantité d'énergie demandée à la batterie et ainsi augmenter l'autonomie du véhicule ;
- les appels d'énergie et de puissance devront être adaptés afin de ne pas utiliser la batterie en dehors des plages normales de fonctionnement qui lui assurent un bon vieillissement et qui dépendent de chaque technologie d'accumulateur ;
- les gestions électrique et thermique seront optimisées en tenant compte des technologies de batterie et des usages spécifiques des véhicules électriques ;
- le régime de charge et de décharge affecte significativement la durée de vie. Pour donner un ordre de grandeur très grossier, on peut estimer que, dans le cas de décharges profondes, le doublement du régime de charge et de décharge (c'est-à-dire la réduction par deux du temps de charge ou de

décharge) réduit d'un tiers le nombre de cycles dont la batterie est capable. La charge rapide d'une batterie se fait donc au détriment de sa durée de vie. De plus, une batterie doit être gérée pour minimiser le vieillissement en évitant les courants et tensions préjudiciables en fonction de son état de charge, de sa température et même de son état de santé (vieillissement) ;

- la résistance interne des accumulateurs au lithium augmente fortement à basse température (inférieure à zéro degré celsius) en raison de la réduction de la cinétique de la réaction électrochimique, ce qui peut entraîner l'accumulation de lithium à la surface de l'électrode négative et nécessite un chauffage *ad hoc*.

G) Le Japon, la Corée du Sud et la Chine détiennent aujourd'hui la majorité du marché des accumulateurs lithium-ion. Leurs limites actuelles conduisent de nombreux pays à lancer d'importants programmes de recherche et développement pour mettre au point la prochaine génération de batteries :

- le Japon a réuni un consortium de 22 organismes et lancé en 2009 un vaste programme de recherche sur sept ans ;
- la Chine s'est dotée d'une industrie et d'universités puissantes ;
- les États-Unis, absents de ce marché, reconstituent leur potentiel industriel au travers du plan de relance décidé en 2009 et de vastes programmes de recherche.

La France s'est dotée récemment, sous l'impulsion de la Direction générale de la recherche et de l'innovation, d'un réseau de recherche et technologie sur le stockage électrochimique de l'énergie, piloté par le professeur Jean-Marie Tarascon. Malgré cette initiative, l'Europe semble avancer en ordre dispersé. Compte tenu des efforts nécessaires dans le domaine, il serait souhaitable que la priorité accordée aux recherches sur les batteries se traduise par la mise en place, dans le cadre de l'espace européen de la recherche, d'une coordination des équipes de recherche européennes sur les batteries lithium-ion à l'image du Japon et des États-Unis ou de la mise en place d'un programme conjoint de recherche.

H) S'il appartient aux entreprises de mener la recherche nécessaire pour optimiser les accumulateurs actuels et les rendre rentables, il revient à l'État, voire à l'Union européenne, de mener ou d'encourager celle qui pourrait conduire à des sauts technologiques à l'horizon de dix ou vingt ans. En ce sens, un effort important de recherche doit être réalisé par les pouvoirs publics sur les électrolytes ioniques et solides, sur les accumulateurs lithium-air ou lithium-nickel

ainsi que sur la mise au point (qui peut être plus rapide) d'électrodes reposant sur des matériaux de synthèse, tels le sulfate de fluor et de lithium ou d'autres oxyanions de fluor.

Il appartient également à la puissance publique de veiller à ce que les pistes les plus prometteuses (à court terme) d'amélioration des batteries soient poursuivies par la recherche en étroite liaison avec l'industrie. C'est en particulier le cas aujourd'hui de l'utilisation du silicium en remplacement partiel du graphite.

I) Des efforts de recherche à long terme doivent également être poursuivis sur des technologies autres que le lithium, notamment sur le zinc-air.

Les performances actuelles des véhicules électriques

1 ■ Autonomie

1.1. Les cycles normalisés existants ne reflètent pas de façon adéquate les consommations et l'autonomie des véhicules électriques

La mesure des consommations et des émissions de CO₂ des véhicules thermiques, hybrides (rechargeables ou non) et tout électriques est essentielle pour orienter le consommateur dans sa décision d'achat, mais aussi parce qu'elle conditionne les redevances et subventions liées à l'achat des véhicules. En France, par exemple, le dispositif de « bonus/malus » introduit en 2007 est lié au taux d'émission de dioxyde de carbone CO₂ : le bonus à l'achat¹ peut aller jusqu'à 5 000 euros pour des véhicules émettant moins de 60 grammes de CO₂ par kilomètre, dans la limite de – 20 % du prix du véhicule batteries incluses et, à l'inverse, le malus² peut atteindre 2 600 euros pour les véhicules rejetant plus de 250 grammes de CO₂ par kilomètre.

Les véhicules homologués en Union européenne après le 1^{er} septembre 2009 (pour la plupart des véhicules particuliers) le sont suivant le règlement (CE) n° 715/2007. Le règlement (CE) n° 692/2008 établi en application du règlement n° 715/2007 définit à l'annexe XII la méthode de mesure des émissions de CO₂ et de la consommation de carburant prévue pour les voitures particulières. Cette méthode est en très grande partie fondée sur le règlement n° 101 de la Commission économique des Nations unies pour l'Europe, CEE-ONU, en particulier sur ses annexes 6 à 10.

[1] « Bonus » : décret n° 2007-1873 du 26 décembre 2007 instituant une aide à l'acquisition des véhicules propres, modifié entre autres par le décret n° 2010-447 du 3 mai 2010.

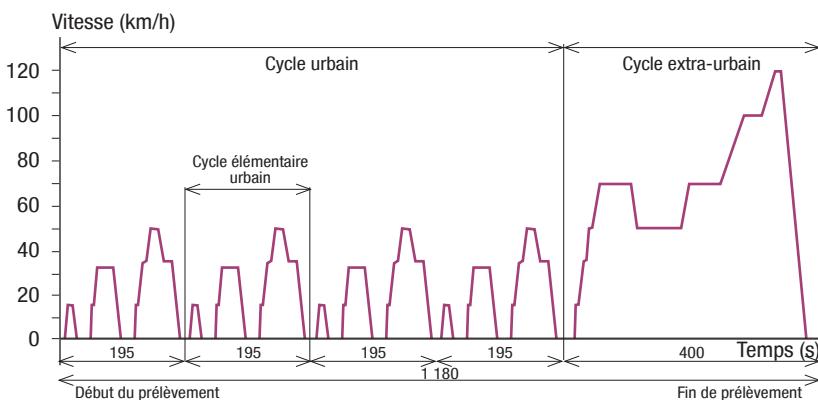
[2] « Malus » : article 63 de la loi n° 2007-1824 du 25 décembre 2007, codifié à l'article 1011 bis du code général des impôts.

Le nouveau cycle de conduite européen simule un parcours urbain de 4 km suivi d'un parcours extra-urbain de 7 km

Les principes de mesure diffèrent selon le type de véhicules : véhicule thermique seul, tout électrique ou hybride, rechargeable ou non. Toutes les procédures d'essai ont en commun que les mesures sont effectuées en faisant suivre au véhicule une courbe de la vitesse en fonction du temps appelée « cycle ».

Le cycle en vigueur pour une réception dans l'UE d'un véhicule thermique ou hybride est communément appelé « Nouveau cycle de conduite européen » ou NEDC (*New European Driving Cycle*). Il est décrit dans l'appendice 1 à l'annexe 4 du règlement n° 83 de la CEE-ONU. Il se compose de deux parties : une partie urbaine (basée sur quatre anciens cycles européens ECE-15) suivie d'un cycle extra-urbain (*Extra-Urban Driving Cycle*, EUDC).

 **Le nouveau cycle de conduite européen**



Source : règlement n° 83 de la Commission économique des Nations unies pour l'Europe (CEE-ONU)

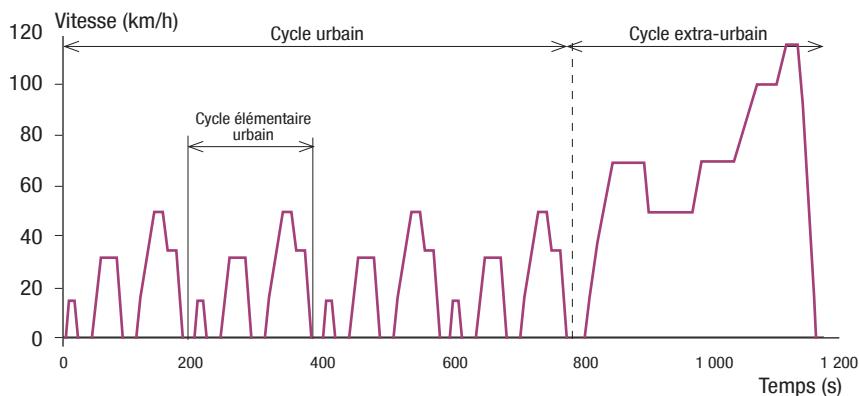
Le cycle prescrit pour les véhicules thermiques et hybrides, rechargeables ou non, diffère légèrement du cycle pour le véhicule électrique. Cette différence provient de la prise en compte de changements de vitesses (rapports) dans le cycle pour véhicules thermiques et hybrides. Le cycle employé pour le véhicule électrique est donc légèrement lissé lors des phases d'accélération. De durée égale, la distance théorique parcourue dans le « cycle électrique » est ainsi de 11 022 m, alors que celle du « cycle thermique et hybride » est de 11 007 m. Les écarts sont donc négligeables au vu des tolérances de mesure prévues

dans les procédures. Ils correspondent par ailleurs aux écarts prévus entre véhicules équipés d'une boîte de vitesses à commande manuelle et ceux équipés d'une boîte automatique, pour lesquels le paragraphe 2.3.3 de l'annexe 4 du règlement n° 83 de la CEE-ONU prévoit un cycle « lissé ».

Le cycle pour véhicule électrique, décrit dans l'annexe 7 du règlement n° 101 de la CEE-ONU est représenté sur la figure suivante.



Le cycle d'essai prévu pour les véhicules électriques



Source : règlement n° 101 de la Commission économique des Nations unies pour l'Europe, CEE-ONU

La différence par rapport au précédent est la disparition de petits paliers dans les phases d'accélération qui correspondaient aux changements de vitesse.

Dans les paragraphes suivants, nous considérerons que les cycles pour véhicules thermiques et hybrides et pour véhicules électriques sont identiques, et nous les désignerons indifféremment par « nouveau cycle de conduite européen » ou NEDC.

Le nouveau cycle de conduite est un agrégat de conduite urbaine et extra-urbaine. La partie urbaine dure 780 secondes alors que la partie extra-urbaine ne dure que 400 secondes. Inversement, le cycle urbain correspond à une distance parcourue de 4 067 m alors que le cycle extra-urbain fait parcourir au véhicule 6 956 m. Lequel pèse plus ? Peu importe. Un cycle unique ne sera, de toute manière, jamais représentatif des usages d'un individu mais constitue une référence. La pertinence de cette référence sera commentée plus loin.

D'autres références existent à travers le monde, en particulier au Japon et aux États-Unis. Les nouveaux cycles américains ont la particularité de tenir compte en partie d'usages différents : ils intègrent un cycle dédié à la conduite sur autoroute, un cycle avec usage d'une climatisation et un cycle représentant une conduite plus agressive. Pour des raisons de concision, nous nous limiterons ici aux dispositions des essais pour l'Europe.

Dans tous les essais, indépendamment du type de véhicules, le nouveau cycle de conduite européen est utilisé mais les procédures diffèrent d'un type de véhicules à un autre.

Les procédures d'essai sont adaptées à chaque sous-catégorie de véhicules

Nous donnons ici les grandes lignes des essais d'homologation.

Les véhicules thermiques non hybrides sont testés à l'aide du nouveau cycle de conduite européen (NEDC). Les émissions de CO₂ et les consommations de carburant mesurées lors de l'essai servent de référence pour vérifier les valeurs déclarées par le constructeur.

Les véhicules hybrides sont traités différemment selon qu'ils sont rechargeables ou non rechargeables, avec une distinction entre des véhicules équipés ou non d'un commutateur de mode de fonctionnement. Grâce à un tel commutateur, le conducteur peut imposer au véhicule un mode de fonctionnement, par exemple purement électrique.

Les véhicules hybrides non rechargeables sont testés suivant le même principe que les véhicules thermiques non hybrides. Or les véhicules hybrides sont équipés d'une batterie qui pourrait fournir de l'énergie (ou en absorber) et ainsi fausser les mesures. Les émissions de CO₂ et la consommation de carburant mesurées lors des essais sont donc corrigées pour faire comme si la batterie ne s'était ni chargée ni déchargée entre le début et la fin du test (bilan énergétique de la batterie égal à zéro). Si le véhicule hybride dispose d'un commutateur de mode de fonctionnement, le test est effectué dans le mode que le constructeur a décidé d'activer par défaut à la mise en marche du véhicule.

Les véhicules hybrides rechargeables sont soumis à une procédure de test qu'on peut exposer schématiquement de la façon suivante : on charge la batterie du véhicule hybride rechargeable, on roule jusqu'à épuisement de la

batterie, puis, on continue à rouler pendant 25 km. La consommation et les émissions de CO₂ mesurées pendant ce parcours sont ensuite divisées par la distance totale parcourue pour obtenir le résultat de l'essai. Plus précisément, la procédure d'essai des véhicules hybrides rechargeables se décompose en deux parties.

Dans la première partie (appelée « condition A » dans les textes), les mesures sont effectuées sur un véhicule qui démarre batterie pleine. Le moteur thermique intervient en général peu, voire pas du tout¹. Il peut démarrer, en particulier, quand l'autonomie en mode électrique pur n'est pas suffisante pourachever un cycle complet (d'une distance théorique de 11 022 m) ou quand le véhicule n'est pas conçu pour rouler en mode électrique au-delà d'une certaine vitesse (la vitesse maximale atteinte sur le cycle est de 120 km/h).

Dans la seconde partie (« condition B » dans les textes), le véhicule part avec une batterie déchargée et fonctionne donc en mode principalement thermique, comme un véhicule hybride non rechargeable. Il ne s'agit pas, en général, d'un mode purement thermique, car dans ce cas le véhicule perdrat tous les bénéfices liés à l'hybridation (par exemple la récupération de l'énergie de freinage, une utilisation du moteur thermique avec des rendements supérieurs et l'arrêt automatique du moteur quand le véhicule est à l'arrêt). Les émissions de CO₂ et la consommation de carburant pour le véhicule sont alors calculées selon une moyenne pondérée entre les deux parties. Le coefficient de pondération de la première partie correspond à l'autonomie du véhicule en mode électrique, exprimée en km. Le coefficient de pondération de la seconde partie est égal à 25 km, correspondant selon les textes à une « distance moyenne hypothétique parcourue entre deux recharges de la batterie », distance fixée de façon arbitraire dans les textes cités plus haut.

Ce qui précède s'applique aux véhicules où l'ordinateur de bord détermine de façon automatique si la traction est effectuée grâce à l'énergie électrique ou à l'énergie thermique. Si le véhicule dispose d'un commutateur de fonctionnement, les procédures d'essai définissent le mode à sélectionner pendant chacune des phases de la procédure. Lors de la première phase, le constructeur peut demander que le véhicule soit configuré en mode électrique

[1] Si l'autonomie du véhicule en mode électrique est suffisante pour compléter un cycle complet, si le véhicule dispose d'un commutateur pour fonctionner en mode électrique pur, et sur demande du constructeur, le véhicule peut fonctionner en mode tout électrique. Dans le cas contraire, le moteur thermique intervient selon les réglages par défaut prévus par le constructeur.

pur, si l'autonomie du véhicule est suffisante pour effectuer un cycle complet. Il peut être avantageux pour le constructeur d'éviter que le moteur thermique soit mis en marche lors de la première phase, car consommation et émissions de CO₂ sont alors réputées nulles. Pendant la seconde phase de la procédure, le texte impose un commutateur en position favorisant au maximum un fonctionnement thermique. Un constructeur n'a, par conséquent, pas intérêt à proposer un mode 100 % thermique, car il perdrat les avantages de l'hybridation lors de la deuxième phase.

Les véhicules électriques sont testés dans des conditions similaires à celles des véhicules thermiques. Les essais visent pour l'essentiel à déterminer la consommation électrique et l'autonomie.

La procédure d'homologation ne tient pas compte de l'usure des véhicules ni de la diversité de leurs usages

Il existe un large consensus pour dire que les cycles normalisés, et plus particulièrement le nouveau cycle de conduite européen, ne reflètent pas de manière adéquate les émissions (de CO₂ et autres) et les consommations réelles des véhicules. La Commission européenne elle-même constate, dans le préambule (15) au règlement (CE) n° 715/2007, qu'une « mise à jour ou un remplacement des cycles d'essai seront peut-être nécessaires pour refléter les changements dans la spécification des véhicules et le comportement des conducteurs ». Plusieurs raisons peuvent expliquer pourquoi les consommations et émissions réelles sont souvent supérieures à celles mesurées lors des cycles d'essai standardisés.

1. Les essais normalisés sont pratiqués avec des *véhicules neufs* ou quasi neufs en état d'entretien presque parfait. Or, la maintenance et l'état général d'un véhicule peuvent avoir un impact important sur sa consommation. Dans le cas des véhicules électriques, le vieillissement pourra jouer un rôle majeur, car une perte de capacité de la batterie entraîne une perte d'autonomie.

2. *Les accélérations* prévues dans le cycle actuel sont assez faibles par rapport aux potentialités des véhicules. Les conducteurs exploitant davantage les capacités d'accélération de leur véhicule constatent donc aujourd'hui des consommations supérieures à celles mesurées sur le nouveau cycle de conduite européen. Par ailleurs, le NEDC prévoit une conduite sur autoroute très réduite : environ 5 % du temps à plus de 100 km/h et moins de 1 % du

temps à 120 km/h. Il en est de même pour tous les types de véhicules, thermiques, hybrides et électriques purs.

3. Dans le même ordre d'idées, les constructeurs peuvent *adapter les comportements de leurs véhicules* afin d'améliorer artificiellement les résultats des mesures pour les essais officiels sans nécessairement améliorer les performances réelles. Une telle pratique est connue sous le terme de « *cycle beating* ». Les conséquences en ont été analysées dans des études qui montrent, par exemple, que les émissions réelles d'oxydes d'azote n'ont quasiment pas diminué entre l'introduction des normes Euro 1 et Euro 4, soit entre 1993 et 2005¹.

4. *Les essais normalisés sont effectués en l'absence de vent.* Or un vent contraire de 30 km/h pour une vitesse du véhicule de 50 km/h peut augmenter la puissance nécessaire à l'avancement d'environ 50 %.

5. *La consommation des auxiliaires*, en premier lieu la climatisation et le chauffage, n'est pas prise en compte. Pour les véhicules thermiques et hybrides, les dispositions suivantes sont prévues dans l'annexe 6 au règlement n° 101 de la Commission économique des Nations unies pour l'Europe : « Seuls les équipements nécessaires au fonctionnement du véhicule pour l'exécution de l'essai doivent être en service (...) Le système de chauffage de l'habitacle doit être coupé, il doit en être de même pour le système de conditionnement d'air, mais son compresseur doit fonctionner normalement ». Les dispositions prévues pour les véhicules électriques dans les annexes 7 et 9 sont similaires : « Les dispositifs d'éclairage et de signalisation et les dispositifs auxiliaires doivent être hors fonction, à l'exception de ceux que nécessitent la conduite des essais et la marche habituelle du véhicule en plein jour ». Or les auxiliaires peuvent avoir un effet important sur les consommations des véhicules. Il en est ainsi du chauffage, quand c'est la batterie qui l'alimente dans le cas du véhicule électrique. Ne pas prendre en compte le chauffage et les possibilités de cogénération offertes par le moteur thermique peut biaiser les résultats de cycles normalisés en faveur du véhicule électrique. La comparaison entre les coûts d'usage des différents types de véhicules se trouve alors elle aussi biaisée. Plus généralement, s'agissant d'un véhicule électrique, l'autonomie est un paramètre très sensible et l'autonomie réelle peut être inférieure de plus de la moitié à celle qui résulte des cycles normalisés (celle publiée par

[1] European Federation for Transport and Environment (2006), « WHO adds pressure for stricter Euro-5 standards », *T&E Bulletin*, n° 146, mars.

les constructeurs). En effet, les véhicules équipés d'un moteur thermique disposent d'une source de chaleur presque « gratuite ».

6. Il convient également de mieux prendre en compte des systèmes dont l'impact visible sur un cycle normalisé est faible, mais dont l'impact réel peut être largement supérieur. Les systèmes *stop & start* peuvent, par exemple, apporter des gains non négligeables dans les centres très encombrés des villes, de 5 % à 10 % en moyenne, pouvant atteindre 20 % à 25 %, alors que leur impact sur les émissions et consommations mesurées sur cycle est extrêmement faible. Par ailleurs, des aides à la conduite économique peuvent apporter des gains en consommation de carburant pouvant dépasser 20 % entre un conducteur particulièrement attentif et un conducteur nerveux.

La mesure de la consommation devrait évoluer

Les cycles actuellement en vigueur dans l'Union européenne nécessitent donc une évolution pour mieux refléter les émissions et consommations réelles. Les États-Unis ont déjà commencé à prendre en compte certaines des critiques adressées aux essais normalisés en introduisant en 2008, entre autres, un cycle pendant lequel le conditionnement d'air est activé¹. Un cycle intégrant du chauffage n'est en revanche pas encore prévu.

L'Union européenne a déjà commencé d'intégrer ces constatations dans la législation, par exemple dans le règlement (CE) n° 443/2009. L'article 12 de ce règlement, intitulé « Éco-innovations », précise qu'« à la demande d'un fournisseur ou d'un constructeur, la réduction des émissions de CO₂ rendue possible en utilisant les technologies innovantes est examinée ».

Par ailleurs, des cycles plus représentatifs de la réalité existent déjà, comme le « *Common Artemis Driving Cycle* » (CADC), développé dans le cadre du projet européen Artemis. En particulier, en usage urbain, ce cycle est plus représentatif de la réalité et comporte notamment des accélérations caractéristiques d'un usage réel. Le tableau suivant illustre la différence de consommation constatée entre le NEDC et le cycle Artemis urbain.

En particulier, le nouveau cycle de conduite européen devra donc évoluer pour intégrer non seulement les nouvelles technologies disponibles dans les véhicules thermiques et hybrides, mais aussi pour s'adapter davantage aux véhicules électriques. De multiples facteurs, du style de conduite aux auxiliaires, auront

[1] U.S. Environmental Protection Agency et U.S. Department of Energy, « Fuel economy test schedules », www.fueleconomy.gov/feg/fe_test_schedules.shtml.

un impact sur la consommation et l'autonomie d'un véhicule électrique. Dans la partie suivante, nous nous attacherons à expliciter certains de ces facteurs et à mesurer leurs effets.

❖ **Exemples de consommations de trois véhicules tests
d'une puissance maximale de 100 kW
sur deux cycles urbains différents**

	Partie urbaine du NEDC (ECE)	Artemis urbain
Véhicule 1 (thermique)	8,8 l/100 km	11,3 l/100 km
Véhicule 2 (hybride)	4 l/100 km	5,7 l/100 km
Véhicule 3 (électrique)	11,6 kWh/100 km	14,7 kWh/100 km

Source des données : Elias Zgheib, Centre énergétique et procédés, MINES ParisTech

**1.2. Impact de la vitesse et de la pente sur la consommation
d'un véhicule électrique**

La puissance mécanique aux roues nécessaire à l'avancement du véhicule peut se calculer de façon indépendante du type de propulsion (véhicule thermique, électrique ou hybride).

❖ **Calcul de la puissance mécanique aux roues
nécessaire à l'avancement du véhicule**

Cette puissance est égale au produit de la force motrice par la vitesse du véhicule :

$$P_{\text{traction}} = F_{\text{motrice}} \times v_{\text{véhicule}}$$

La force motrice est égale à la somme de la force nécessaire pour accélérer (égale au produit de la masse par l'accélération du véhicule) et de la force résistante d'où :

$$P_{\text{traction}} = (m_{\text{véhicule}} \times a + F_{\text{résistante}}) \times v_{\text{véhicule}}$$

La force résistante est pour l'essentiel la somme de trois forces liées à la résistance au roulement, la résistance aérodynamique et la résistance à la pente :

$$F_{\text{résistante}} = F_{\text{roulement}} + F_{\text{aérodynamique}} + F_{\text{pente}}$$

On peut caractériser ces trois forces de la façon simplifiée suivante :

- *la résistance au roulement* est, en première approximation, proportionnelle à la masse du véhicule. En supposant qu'il y a roulement sans glissement, on a :

$$F_{\text{roulement}} = C_{\text{résistance au roulement}} \times m_{\text{véhicule}} \times g$$

avec g l'accélération de la pesanteur¹ ;

- *la résistance aérodynamique* dépend en particulier du coefficient de traînée (souvent noté C_d ou C_x) et de la surface frontale S_p fonctions de la forme du véhicule, de la vitesse du véhicule et de celle du vent contraire à l'avancement. Une formule simplifiée serait la suivante :

$$F_{\text{aérodynamique}} = \frac{1}{2} \rho_{\text{air}} C_D S_{\text{frontale}} (v_{\text{véhicule}} + v_{\text{vent}})^2$$

avec ρ_{air} la masse volumique de l'air et la vitesse du vent supposée positive quand elle arrive de face (dans le sens contraire du déplacement du véhicule). Notons que la résistance aérodynamique augmente comme le carré de la vitesse du véhicule et du vent ;

- *la résistance à la pente* est fonction de la masse du véhicule et de la pente, comme l'illustre la relation suivante :

$$F_{\text{pente}} = m_{\text{véhicule}} \times g \times \sin \alpha$$

avec g l'accélération de la pesanteur et α l'angle de la pente.

Grâce aux formules simplifiées ci-dessus on obtient la puissance mécanique aux roues nécessaire à l'avancement du véhicule².

La figure suivante illustre la contribution de la résistance au roulement et de la résistance aérodynamique à la force résistante sur terrain plat.

[1] Plus précisément, la formule est :

$$F_{\text{roulement}} = C_{\text{résistance au roulement}} \times m_{\text{véhicule}} \times \cos \alpha \times g \quad \text{avec } \alpha \text{ l'angle de la pente.}$$

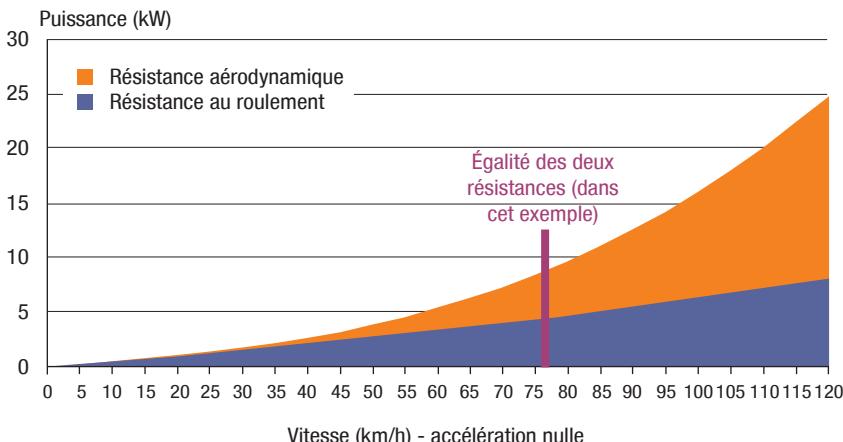
[2] La formule complète est :

$$P_{\text{traction}} = (m_{\text{véhicule}} \times a + C_{\text{résistance au roulement}} m_{\text{véhicule}} \times \cos \alpha \times g) \dots$$

$$\dots + \frac{1}{2} \rho_{\text{air}} C_D S_{\text{frontale}} (v_{\text{véhicule}} + v_{\text{vent}})^2 + m_{\text{véhicule}} \times \sin \alpha \times g) \times V_{\text{véhicule}}$$



Évolution de la puissance aux roues nécessaire à l'avancement du véhicule sur route plane Contribution des résistances au roulement et aérodynamiques



Source : CAS

Au-dessous d'environ 75 km/h, la résistance au roulement est plus élevée. Au-dessus, la résistance aérodynamique prédomine.

La vitesse a un impact significatif sur la consommation d'un véhicule, thermique ou électrique. Ainsi, à 100 km/h, la puissance demandée aux roues d'un véhicule moyen peut être supérieure d'environ dix fois à celle demandée sur le même véhicule roulant à 25 km/h. La puissance aux roues évolue en effet comme une fonction de troisième degré avec la vitesse du véhicule : la résistance aérodynamique est une fonction du deuxième degré de la vitesse du véhicule, multipliée ensuite à nouveau par la vitesse du véhicule pour obtenir la puissance aux roues nécessaire à l'avancement. Sur un véhicule circulant à 100 km/h, un vent contraire de 30 km/h peut engendrer une demande de puissance supérieure de 40 % par rapport à une situation sans vent.

Outre la vitesse, la pente a un impact important sur la demande de puissance aux roues. À des vitesses faibles, la demande de puissance aux roues peut presque décupler sur une pente de 10 % par rapport à un trajet sans pente. Même à des vitesses plus élevées, des trajets en pente peuvent avoir un effet important sur la demande de puissance aux roues.

Sur un véhicule thermique, la consommation dépend de la puissance mécanique aux roues mais aussi des nombreux composants sur la chaîne de traction, qui ont chacun des courbes de rendement spécifiques. Le moteur thermique, en particulier, n'a pas un rendement optimal à tous les régimes et sa courbe de rendement dépend beaucoup de sa conception. Par conséquent, la consommation d'un véhicule thermique n'évolue pas de façon linéaire avec la vitesse.

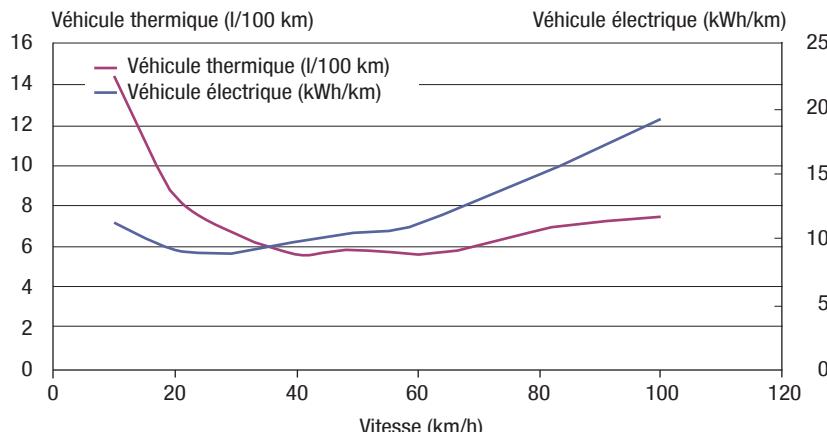
La consommation d'un moteur électrique est plus linéaire que celle d'un moteur thermique et son rendement, plus élevé pris séparément, varie moins en fonction de la vitesse et du couple. Par ailleurs, la chaîne de traction de la plupart des véhicules électriques est moins sophistiquée que celle d'un véhicule thermique. Néanmoins, il serait simpliste de considérer que la consommation d'un véhicule électrique varie linéairement avec la puissance demandée aux roues, car il faut prendre en compte les rendements non linéaires des composants de la chaîne de traction.

La différence d'allure de l'évolution des consommations entre véhicules thermiques et électriques est illustrée sur la figure suivante, dans laquelle sont comparées les allures de deux courbes de consommation – pour un véhicule thermique non hybride et un véhicule électrique, tous deux choisis à titre d'exemple. On voit qu'un véhicule thermique non hybride peut avoir des consommations élevées à basse vitesse. L'hybridation croissante des véhicules amène à contrebalancer cet effet et permet d'obtenir des courbes de consommation variant plus linéairement avec la vitesse, de façon similaire à la courbe du véhicule électrique.

Nous examinerons seulement ici la puissance demandée aux roues pour un véhicule donné, sans en tirer de conclusions directes sur la consommation d'un véhicule électrique. La mesure de la consommation d'un véhicule électrique en fonction de la vitesse serait trop spécifique au véhicule choisi et varierait trop selon les choix techniques du constructeur. La courbe de demande de puissance aux roues varie aussi en fonction du véhicule (pneus, forme du véhicule, masse, etc.). Mais son allure est assez générale et ne dépend pas de choix techniques sur la chaîne de traction.



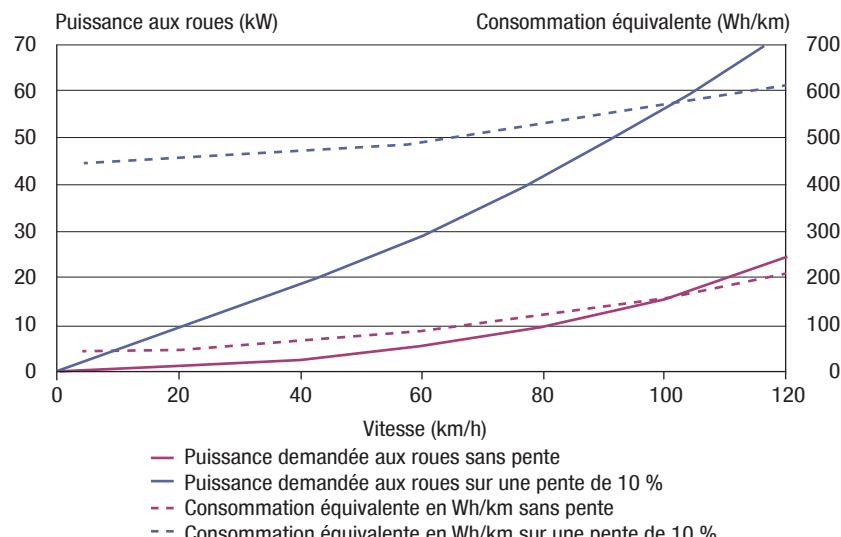
Comparaison des allures de courbes de consommation d'un véhicule thermique et d'un véhicule électrique donnés à vitesse stabilisée



Source des données : Elias Zgheib, Centre énergétique et procédés, MINES ParisTech



Évolution de la puissance aux roues en fonction de la vitesse en régime permanent et de la pente sur un véhicule donné



Source : CAS

La figure précédente montre l'impact de la vitesse et d'une pente de 10 % sur la demande de puissance aux roues d'un véhicule donné. À fin d'illustration, nous avons aussi calculé et tracé la consommation équivalente en Wh/km, sachant que la consommation réelle du véhicule dépendra de bien d'autres facteurs sur la chaîne de traction du véhicule. Comme le montrent aussi les formules ci-dessus, on remarquera que l'effet de la pente, en consommation équivalente (en Wh/km), est indépendant de la vitesse (d'environ 400 Wh/km pour le véhicule considéré).

La puissance demandée aux roues dépend bien sûr aussi du chargement du véhicule. Un autre élément important, qui n'apparaît pas sur la figure précédente et qui peut avoir un impact significatif sur la consommation électrique, est la prise en compte des accélérations, qui traduisent en général un style de conduite plus ou moins agressif ou des conditions de circulation plus ou moins favorables.

1.3. L'autonomie du véhicule électrique dépend de l'utilisation des auxiliaires, spécialement du chauffage et de la climatisation

Comme on l'a vu, la consommation des auxiliaires n'est pas prise en compte dans les essais officiels européens qui déterminent l'autonomie théorique du véhicule électrique. Nous récapitulons dans le tableau suivant la consommation des auxiliaires équipant la majorité des véhicules.

💡 Puissance électrique de certains auxiliaires d'un véhicule moyen

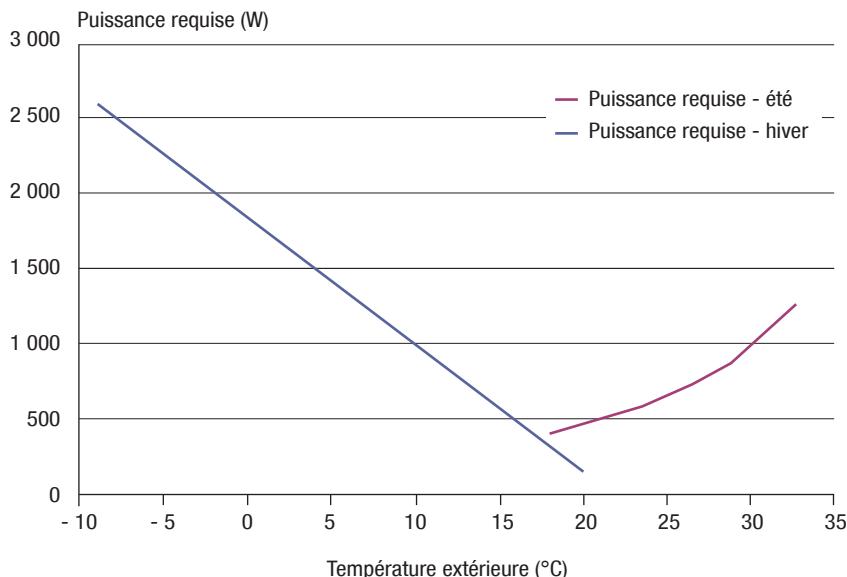
Ordres de grandeur de puissances électriques	Puissance (W)
Phares et éclairage additionnel	250
Feux de brouillard avant	110
Feux de brouillard arrière	30
Radio – système audio	15 – 100
Vitre arrière dégivrante	150
Chauffage de siège	150
Essuie-glace avant	50
Essuie-glace arrière	30
Air conditionné	2 500 W installés
Chauffage (véhicule électrique)	5 000 W installés

Source : CAS

Évidemment, les auxiliaires ne consomment pas toujours de façon simultanée et à leur puissance maximale. En particulier la consommation du chauffage et de l'air conditionné dépend de la température extérieure, de l'humidité et de la radiation du soleil. La figure suivante illustre, sur l'exemple des conditions météorologiques typiquement observées à Paris, la puissance en chauffage ou en refroidissement nécessaire pour maintenir un véhicule à une température et une humidité intérieure donnée. La courbe ne tient pas compte des régimes transitoires pour le chambrage de l'habitacle, lors desquels la puissance demandée peut être de deux à trois fois plus élevée qu'en régime stationnaire. La phase transitoire est plus longue pour le refroidissement, où elle peut durer de 10 à 20 minutes. Pour éviter d'affecter excessivement leur autonomie, les véhicules électriques peuvent être équipés de systèmes de pré-chambrage, qui permettent de les amener à la température souhaitée pendant qu'ils sont branchés sur le secteur.



**Puissance requise pour chauffer ou refroidir l'habitacle
d'un véhicule en régime stabilisé (22 °C en hiver, 24 °C en été,
50 % d'humidité relative) - Données météorologiques de Paris**



Source des données : Elias Zgheib, centre énergétique et procédés, MINES ParisTech

Le graphique précédent montre les puissances requises pour chauffer ou refroidir l'habitacle. Les puissances réellement consommées dépendent de la technologie utilisée pour chauffer ou refroidir et des rendements liés à cette technologie.

Parallèlement à la mise à température de l'habitacle, il s'agit aussi d'y maintenir une certaine humidité relative de l'air pour éviter l'embuage des vitres. Le désembuage peut engendrer des surconsommations considérables dans les pays très humides mais reste un facteur négligeable en France.

En somme, les consommations majeures d'auxiliaires sont principalement liées au confort thermique. Si l'air conditionné a un impact important sur la consommation d'un véhicule thermique, le chauffage peut quant à lui avoir un impact majeur sur la consommation et l'autonomie d'un véhicule électrique. La question du chauffage apparaît avec le véhicule électrique car la disponibilité en chaleur des véhicules thermiques est telle qu'il n'a jamais été nécessaire de développer des chauffages performants.

La climatisation équipe déjà les véhicules thermiques et a donc bénéficié d'améliorations notables. Les systèmes installés dans la plupart des véhicules électriques fonctionnent grâce à un compresseur électrique alors que, dans les véhicules thermiques, le compresseur est souvent lié mécaniquement au moteur. Une climatisation électrique peut ainsi obtenir des rendements supérieurs aux systèmes communément employés dans les véhicules thermiques. Les constructeurs s'attachent à améliorer ces systèmes. Les travaux menés en priorité pour le véhicule électrique pourront ensuite bénéficier à tous les types de véhicules.

Une particularité des auxiliaires est que leur consommation est proportionnelle au temps d'utilisation et non au nombre de kilomètres parcourus. À des vitesses faibles, par exemple en ville ou dans un embouteillage, les auxiliaires peuvent donc avoir un impact important sur l'autonomie des véhicules électriques.

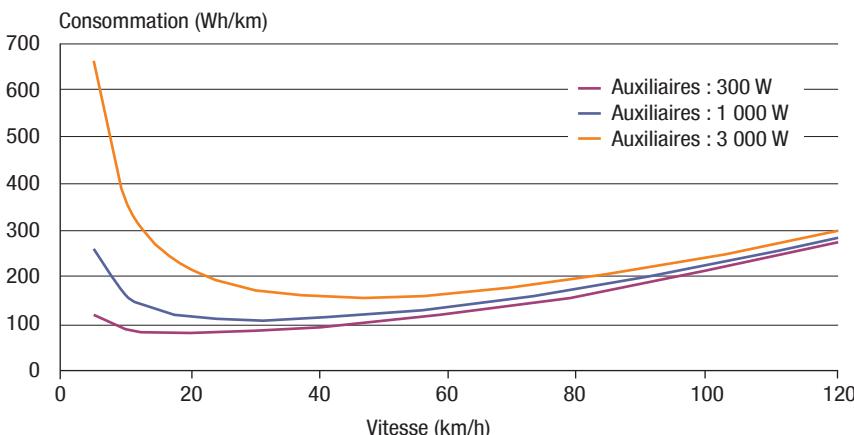
Pour illustrer cet impact, le scénario sans pente de la figure *supra* relative à l'évolution de la puissance aux roues en fonction de la vitesse en régime permanent et de la pente, a été repris, en supposant en première approximation que la consommation électrique du véhicule était proportionnelle à la puissance demandée aux roues et en ajoutant une consommation d'auxiliaires selon trois scénarios : premièrement en conditions normales sans besoin particulier de chauffage ou de climatisation (300 W), ensuite en conditions

hivernales ou estivales (1 000 W de climatisation ou de chauffage) et trois fois en conditions hivernales très froides (par -5 °C à l'extérieur : 3 000 W de chauffage sur un système de chauffage non optimisé).

Les résultats de ces calculs sont reportés sur la figure suivante et illustrent l'impact que les auxiliaires peuvent avoir sur la consommation à des vitesses faibles.



Évolution de la consommation en fonction de la vitesse et des auxiliaires



Source : CAS

1.4. L'autonomie réelle des véhicules électriques dépendra beaucoup de l'usage qu'en feront les utilisateurs

Trois scénarios ont été constitués (*voir tableau suivant*) qui correspondent à des usages d'un véhicule électrique insuffisamment représentés dans le nouveau cycle de conduite européen. Il a été supposé dans cet exemple que le véhicule était équipé d'un système de chauffage électrique. Certains petits véhicules électriques aujourd'hui en circulation, en général des quadricycles, n'ont ni chauffage ni climatisation. Dans le futur, il est probable que les deux-roues et les quadricycles électriques rouleront sans chauffage et pourront ainsi être équipés de batteries plus petites et plus économiques.

⌚ **Autonomies calculées d'un véhicule électrique donné en fonction d'usages types**

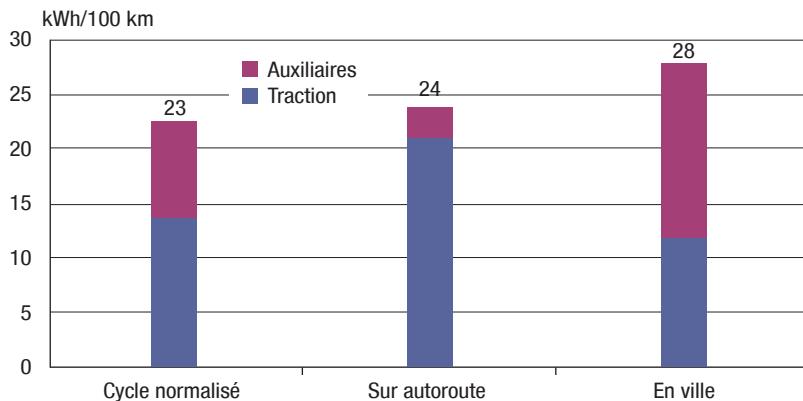
Hypothèses	
Capacité de la batterie	22 kWh
Autonomie sur cycle normalisé [vitesse moyenne : 33,6 km/h]	160 km
Consommation liée à la traction	13,8 kWh/100 km
Scénario 1 - Conduite sur cycle normalisé en conditions hivernales (par - 5 °C à l'extérieur)	
Consommation liée à la traction	13,8 kWh/100 km
Consommation des auxiliaires	3 kW
Vitesse moyenne	33,6 km/h
Consommation totale	22,7 kWh/100 km
Autonomie	97 km
Scénario 2 - Conduite sur autoroute à 100 km/h en conditions hivernales (par - 5 °C à l'extérieur)	
Consommation liée à la traction	21,0 kWh/100 km
Consommation des auxiliaires	3 kW
Vitesse moyenne	100 km/h
Consommation totale	24,0 kWh/100 km
Autonomie	92 km
Scénario 3 - Conduite sur cycle urbain en conditions hivernales (par - 5 °C à l'extérieur)	
Consommation liée à la traction	12,0 kWh/100 km
Consommation des auxiliaires	3 kW
Vitesse moyenne	18,8 km/h
Consommation totale	28,0 kWh/100 km
Autonomie	79 km

Source : CAS

Il est peu surprenant de constater que l'usage intensif du chauffage dans ces trois scénarios fait significativement baisser l'autonomie qu'on peut espérer obtenir avec un véhicule électrique dans ces conditions assez sévères. Par ailleurs, un vent contraire de 30 km/h, avec un véhicule circulant sur autoroute à 100 km/h, peut faire augmenter la puissance nécessaire à la traction de plus de 40 %. Dans le scénario, l'autonomie baisserait alors à 68 km. En ville, en situation de bouchons, donc avec des vitesses moyennes de l'ordre de 10 km/h, l'autonomie théorique peut descendre au-dessous de 60 km, ce qui correspondrait à un roulage continu théorique de six heures dans des centres congestionnés.

Dans les scénarios précédents, nous n'avons pas tenu compte des effets transitoires liés au réchauffement initial du véhicule mais, en revanche, nous avons choisi des consommations de chauffage relativement prudentes que des systèmes innovants promettent de faire baisser sensiblement. La figure suivante illustre le poids relatif dans la consommation électrique des auxiliaires et de la traction.

⌚ **Consommation électrique en conditions hivernales par – 5 °C à l'extérieur**



Source : CAS

Pour comparaison, le tableau suivant reprend les éléments que Nissan publie pour son véhicule électrique Leaf, à l'occasion de son entrée sur le marché américain¹.

[1] Données disponibles à l'adresse suivante : www.nissanusa.com/leaf-electric-car/index#/leaf-electric-car/range-disclaimer/index.

♡ **Données sur l'autonomie publiées par Nissan pour son véhicule électrique Leaf**

Scénario	Vitesse moyenne	Température	Climatisation	Autonomie
Conditions idéales (vitesse constante dans une plaine)	61 km/h	20 °C	non	222 km
Conduite extra-urbaine par beau temps	39 km/h	22 °C	non	169 km
Autoroute en été	89 km/h	35 °C	oui	113 km
Trajet extra-urbain/urbain un jour chaud (exemple : domicile-travail)	79 km/h	43 °C	oui	109 km
Trajet urbain embouteillé en hiver	24 km/h	- 10 °C	oui	100 km

Source : CAS

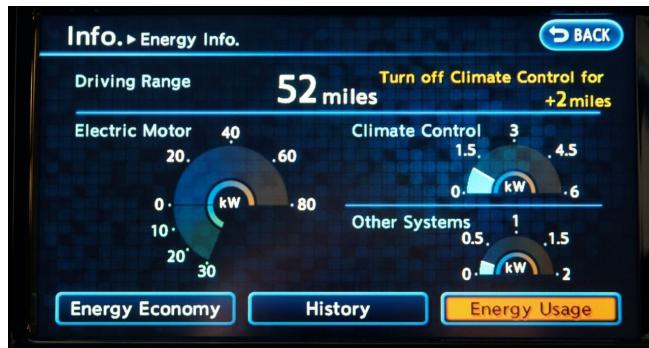
Les valeurs absolues des autonomies indiquées sont à considérer avec précaution car Nissan indique qu'il s'agit de données calculées pour un véhicule disposant d'une batterie neuve. En revanche, la comparaison illustre bien que l'autonomie des véhicules électriques dépendra beaucoup de leurs usages.

1.5. Des systèmes performants d'information des conducteurs sont en cours de développement

L'autonomie des véhicules électriques étant relativement faible, il est nécessaire de disposer d'informations précises sur l'état de charge de la batterie et l'autonomie restante. Les systèmes disponibles sont souvent installés sur des véhicules en développement ou sur des véhicules en petites séries. Les affichages sont alors souvent assez sommaires et se bornent à indiquer soit l'état de charge (en pourcentage de la capacité de la batterie), soit le nombre de kilomètres restants. Dans ce cas, le calcul fait intervenir la consommation moyenne relevée sur les derniers kilomètres parcourus – en général les derniers 100 à 200 km – qui peut être sans rapport avec celle qui va intervenir. L'inconvénient de ces affichages est également qu'ils ne tiennent pas compte du fait que la consommation du véhicule varie en fonction des auxiliaires en fonctionnement, des conditions extérieures (comme la pente en particulier) et de la façon de conduire du conducteur.

Ces affichages simples ne suffiront sans doute pas à inciter les conducteurs à profiter pleinement de l'autonomie de leur véhicule. Ne pouvant se fier à ces informations trop sommaires, ils risquent de limiter leur usage du véhicule pour éviter la panne sèche, même si techniquement le véhicule offre une autonomie bien supérieure. Un automobiliste disposant d'un véhicule électrique dont l'autonomie à l'homologation est de 160 km mais qui aura évalué l'autonomie réelle à 80 km, qui fait un trajet de 20 km par jour aller, rechargera chaque jour son véhicule, ne se servant effectivement que de 40 km d'autonomie. Ayant pris conscience de ces limitations, certains constructeurs travaillent sur des systèmes de navigation intelligents qui intégreront l'autonomie du véhicule dans le calcul des trajets et pourront alerter le conducteur si son utilisation du chauffage risque de l'empêcher d'arriver à destination. Par ailleurs, ces systèmes pourraient fournir des informations sur les points de recharge. À titre d'exemple, l'illustration suivante montre l'affichage du système de navigation de la Nissan Leaf, déjà commercialisée aux États-Unis.

♡ Affichage de consommation électrique dans la Nissan Leaf



Source : [autobloggreen \(<http://green.autoblog.com/2010/10/22/2011-nissan-leaf-review-drive-second/>\)](http://green.autoblog.com/2010/10/22/2011-nissan-leaf-review-drive-second/)

L'affichage indique à la fois la consommation du moteur électrique (avec possibilité de régénération d'énergie dans la batterie), de la climatisation (chauffage inclus) et des autres auxiliaires. L'affichage représenté ci-dessous illustre quelques fonctions intégrées dans le système de navigation.

💡 **Quelques fonctions proposées par le système de navigation de la Nissan Leaf**



Source : [autobloggreen \(http://green.autoblog.com/photos/nissan-leaf-9/#3494584\)](http://green.autoblog.com/photos/nissan-leaf-9/#3494584)

Le conducteur peut par exemple afficher les stations à proximité. Il peut aussi préchauffer ou prérefroidir son véhicule pour entrer dans un habitacle à bonne température. En effectuant cette mise à température lorsque le véhicule est branché sur le secteur, et non en début de trajet, il préserve l'autonomie de son véhicule¹. L'exemple de Nissan montre que les constructeurs sont habitués désormais à développer des systèmes de navigation et sauront surmonter les limites mentionnées ci-dessus pour proposer des systèmes fiables et rassurants.

2 ■ Puissance, accélération, vitesse, réduction de la pollution et du bruit

Nous abordons ici les critères de performance des véhicules électriques, en particulier par rapport aux véhicules thermiques. Certaines de ces performances seront des critères de choix pour les futurs acheteurs, particuliers ou professionnels, d'autres influenceront peut-être les décisions des acteurs publics.

2.1. Les moteurs électriques permettent une accélération très linéaire et puissante grâce à un couple élevé disponible immédiatement

Une des particularités des moteurs électriques est qu'ils ont un couple en général bien plus important qu'un moteur thermique de puissance égale et que le

[1] Cette phase transitoire peut représenter une large partie de la consommation énergétique sur des trajets courts et moyens.

couple maximal est disponible immédiatement, contrairement au moteur thermique où le couple maximal n'est atteint que pour certains régimes. Comme les véhicules électriques actuels sont équipés de transmissions à un rapport, de nombreux conducteurs soulignent une conduite fluide et dynamique, équivalente à celle d'un véhicule équipé d'un moteur thermique et d'une boîte de vitesses automatique bien conçue, voire plus agréable.

Le tableau suivant donne quelques exemples de comparaisons directes entre véhicules électriques et thermiques disposant de moteurs de puissances équivalentes.

Comparaison des couples de quelques véhicules thermiques et électriques

	Puissance maximale	Couple maximal
Nissan Versa (thermique)	80 kW	150 Nm
Nissan Leaf (électrique)	80 kW	280 Nm
Mitsubishi i (thermique)	47 kW	94 Nm
Mitsubishi i-Miev (électrique)	47 kW	180 Nm
Renault Fluence 1.6 (thermique)	81 kW	151 Nm
Renault Fluence Z.E. (électrique)	70 kW	226 Nm

Nm : Newton-mètre.

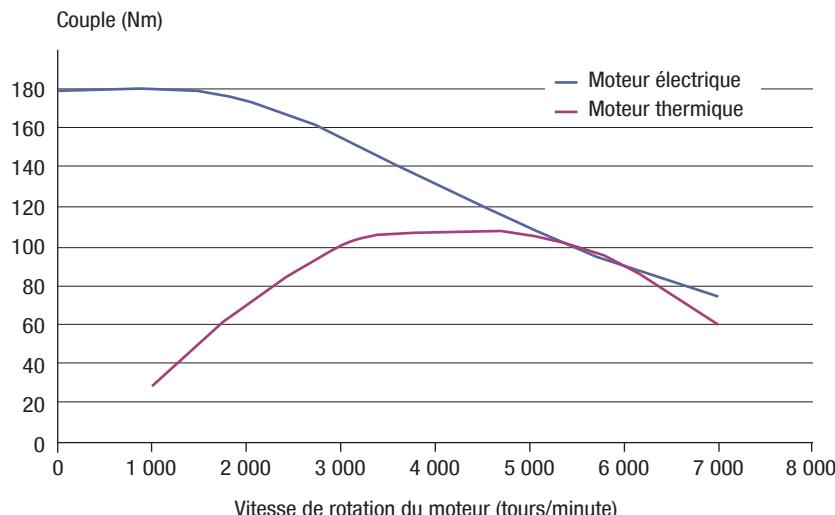
Source : CAS

Dans ce tableau ont été choisis des véhicules tout électriques et des véhicules thermiques non hybrides pour comparer les deux technologies extrêmes sans hybridation.

Les véhicules électriques disposent ainsi d'un couple plus élevé à puissance égale mais aussi d'un couple disponible immédiatement, comme l'illustre la figure suivante.



Allure comparée des couples d'un moteur électrique et d'un moteur thermique



Source : CAS

Le couple élevé disponible immédiatement est surtout apprécié par les conducteurs en ville, où le véhicule électrique apporte les principaux bénéfices.

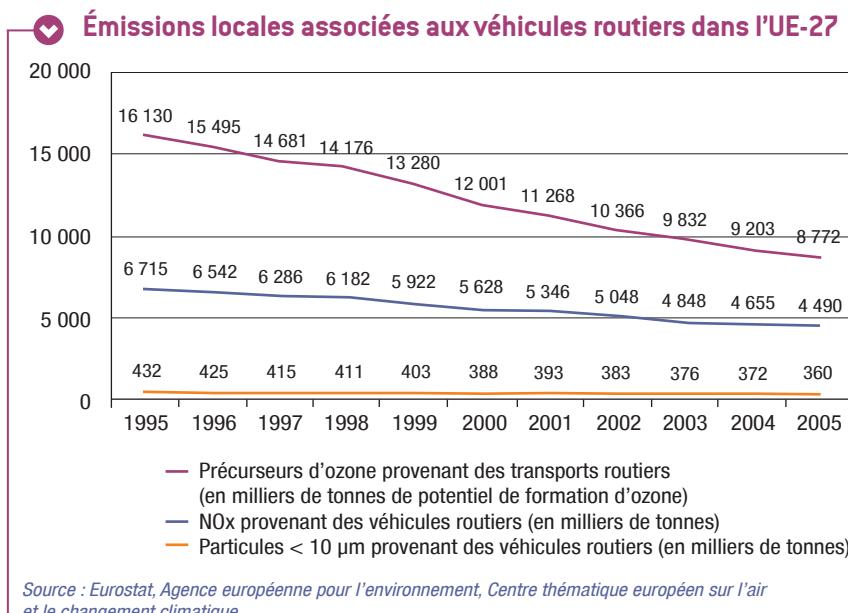
2.2. Les véhicules électriques pourraient réduire les niveaux de pollution dans les zones urbaines

Le critère principal mis en avant par les constructeurs automobiles est l'absence d'émissions à l'usage. À l'exception de certains modèles équipés de chauffage thermique¹, la plupart des véhicules qui seront mis sur le marché seront en effet sans émissions au moment de l'utilisation. Au-delà de la question des émissions de CO₂, l'absence d'émissions locales pourra être un critère de choix majeur, en particulier pour des pouvoirs publics locaux. Différentes villes européennes sont aujourd'hui confrontées à des concentrations de particules fines²,

[1] Le chauffage est alors assuré par un brûleur, qui convertit un hydrocarbure embarqué en chaleur. Un tel dispositif permet d'assurer un confort thermique sans affecter l'autonomie mais s'accompagne d'émissions similaires à celles d'un véhicule thermique, voire plus nocives si le dispositif n'est pas équipé d'un système de retraitement des émissions comme un pot catalytique.

[2] Selon la Commission européenne, « les particules fines, c'est-à-dire les particules ayant un diamètre inférieur à 10 µm [PM10], peuvent pénétrer profondément dans les poumons et y occasionner des inflammations et une détérioration de la santé des personnes souffrant de maladies pulmonaires ou cardiaques ».

d'ozone¹ ou d'oxydes d'azote² NOx trop élevées. Or les émissions locales des véhicules routiers n'ont cessé de diminuer depuis les années 1990, comme l'illustre la figure suivante.



Source : Eurostat, Agence européenne pour l'environnement, Centre thématique européen sur l'air et le changement climatique

[1] Selon la Commission européenne : « L'ozone est un gaz très réactif causant ou provoquant des problèmes respiratoires chez l'homme et les animaux. Il est également toxique pour les plantes et peut conduire à une détérioration du feuillage et à la défoliation. L'ozone troposphérique ou au niveau du sol est un polluant secondaire. Il se forme lorsque des concentrations suffisantes de gaz précurseurs entrent en contact sous l'effet de la lumière du soleil. De fortes concentrations d'ozone provoquent le phénomène de brouillard d'été. L'ozone troposphérique est également un gaz à effet de serre. La réduction des effets secondaires négatifs des transports est un élément important de la stratégie de développement durable. Les précurseurs sont en principe les composés organiques volatils, les oxydes d'azote, le monoxyde de carbone et le méthane. À l'exception du méthane, ces précurseurs sont tous produits en quantités significatives par des moteurs à combustion interne non contrôlés. Des facteurs de pondération sont utilisés pour combiner les émissions de gaz individuels, par l'intermédiaire de leur potentiel de formation d'ozone troposphérique. Ces facteurs sont les suivants : oxydes d'azote = 1,22, composés organiques volatils (méthane exclu) = 1, monoxyde de carbone = 0,11, méthane = 0,014 ».

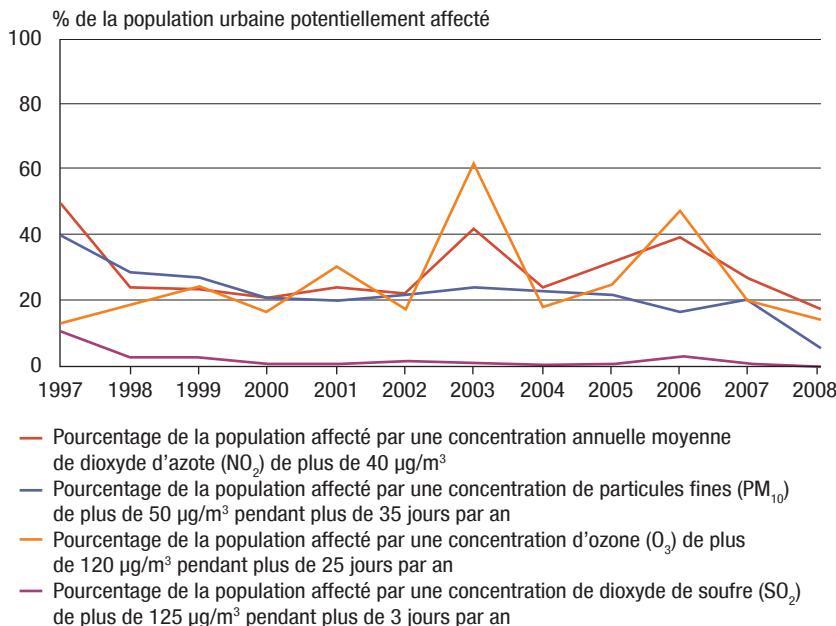
[2] Selon la Commission européenne : « L'oxyde nitrique (NO) est sans couleur et inodore. La molécule d'oxyde nitrique est un radical libre, qui le rend très réactif et instable. Dans l'air, il réagit rapidement avec l'oxygène pour former du dioxyde d'azote (NO₂) qui est un gaz toxique odorant, brun, acide, hautement corrosif, responsable de la couleur brune-jaune du brouillard photochimique. Environ 90 % des oxydes d'azote (NOx) provenant de la combustion de combustibles fossiles sont émis en tant que NO. L'acide nitrique est formé par la réaction des oxydes d'azote avec l'eau et il contribue fortement à la formation de pluies acides. Les oxydes d'azote (NO et NO₂) rapportés comme NOx) sont le précurseur le plus important d'ozone troposphérique et de particules ».

LA VOITURE DE DEMAIN : CARBURANTS ET ÉLECTRICITÉ

Les normes actuelles pour les véhicules vendus dans l'Union européenne ont certainement contribué à cette baisse. Ainsi, depuis 2000 (norme Euro 3), les émissions d'oxydes d'azote autorisées ont été plus que divisées par deux dans la norme Euro 5 actuellement en vigueur. Cette norme prévoit des limites plus strictes pour les particules, avec une division par cinq des seuils autorisés entre les normes Euro 4 (2005) et Euro 5. La norme Euro 6 prévue pour 2014 poursuit cette tendance, en imposant des contraintes importantes en particulier sur les véhicules équipés de moteur diesel, pour lequel le seuil d'oxydes d'azote autorisé est plus que divisé par deux par rapport à la norme Euro 5.

❖ Pourcentage de la population affecté par des concentrations de polluants trop élevés

(pays membres de l'Agence européenne pour l'environnement, dans les zones urbaines équipées de points de mesure)



Source : Agence européenne pour l'environnement

Néanmoins, les niveaux d'exposition des populations urbaines ne semblent pas encore diminuer de façon significative et demeurent trop élevés. L'Agence

européenne pour l'environnement relève ainsi qu'entre 18 % et 50 % de la population urbaine européenne a pu être exposée, entre 1997 et 2008, à des concentrations de particules supérieures aux limites fixées par l'UE. De même, 13 % à 62 % des urbains européens ont pu être exposés à des niveaux d'ozone supérieurs aux valeurs cibles de l'UE. La figure précédente illustre l'évolution de ces expositions en Europe.

Sans être la solution unique à ces problèmes, les véhicules électriques et hybrides rechargeables peuvent néanmoins contribuer à une réduction des niveaux de pollution locale. Il est donc possible que des collectivités locales décident de restreindre l'accès aux centres-villes, à l'image des zones déjà existantes en France, mais de taille très réduite, ou des « Umweltzonen » en Allemagne, où de nombreux centres-villes sont interdits aux véhicules les plus polluants.

2.3. Le bruit

Un autre argument souvent mis en avant par les constructeurs automobiles est l'« absence » de bruit émis par les véhicules électriques. La réalité est plus nuancée : il s'agit en particulier de distinguer le bruit extérieur et le bruit à l'intérieur du véhicule.

Le bruit se mesure par la pression sonore, exprimée en pascal. Pour une meilleure lisibilité, on utilise souvent une échelle logarithmique dérivée de la mesure en pascal, et on exprime alors le niveau sonore en décibels (dB). Comme il s'agit d'une échelle logarithmique, on ne peut pas simplement additionner des valeurs de dB : par exemple, l'addition de deux sources sonores émettant chacune 70 dB est équivalente à une seule source sonore de 73 dB.

Par ailleurs, l'oreille humaine a une sensibilité différente en fonction de la fréquence du bruit et perçoit, par exemple, les sons graves différemment des sons aigus. Pour tenir compte de cette spécificité, on applique fréquemment un filtre aux mesures sonores afin d'obtenir une mesure plus conforme à la perception de l'oreille humaine. Le résultat de cette mesure et de l'application du filtre est alors exprimé en dB(A).

L'absence de moteur thermique fait baisser sensiblement le bruit à l'intérieur du véhicule à vitesse faible

Les véhicules électriques et hybrides rechargeables en mode électrique se distinguent par un bruit à l'intérieur de l'habitacle nettement plus faible que dans les véhicules thermiques à faible vitesse ainsi que lors des démarriages et

accélérations. Les qualités acoustiques d'un véhicule dépendant d'autres paramètres que le moteur, dans le tableau suivant ont été reportées deux paires de véhicules les plus proches possible. La première paire correspond en réalité au même véhicule, la Chevrolet Volt (qui sera commercialisée en Europe sous le nom d'Opel Ampera), un véhicule hybride rechargeable pouvant fonctionner à la fois en mode tout électrique et en mode hybride thermique et électrique.

Comparaison des bruits intérieurs de véhicules thermiques et électriques ou hybrides rechargeables

	Chevrolet Volt mode électrique	Chevrolet Volt mode hybride thermique/électrique	Nissan Leaf (véhicule tout électrique)	Nissan Versa (véhicule thermique comparable)
Source	insideline.com	insideline.com	edmunds.com	edmunds.com
Bruit intérieur au ralenti	27 dB(A)	49 dB(A)	37 dB(A)	41 dB(A)
Bruit intérieur à accélération maximale	54 dB(A)	78 dB(A)	68 dB(A)	78 dB(A)
Bruit intérieur à vitesse constante de 113 km/h (70 miles/h)	67 dB(A)	74 dB(A)	68 dB(A)	70 dB(A)

Sources : insideline.com, edmunds.com

Ces exemples ont été choisis pour avoir des véhicules et des résultats comparables. Si les valeurs absolues de ces chiffres ne sont pas généralisables, on peut néanmoins généraliser la tendance. Par ailleurs, il convient de noter que ces valeurs ont été mesurées sur un type de route spécifique et que d'autres types de revêtement engendreraient d'autres niveaux de bruit. La différence dans le cas de la Chevrolet Volt est assez notable, en particulier lors de la phase d'accélération où le moteur thermique contribue pour 24 dB(A) au bruit intérieur au véhicule. Même sur autoroute à vitesse constante, le différentiel de 7 dB(A) est clairement perceptible. La comparaison de la Nissan Leaf et de la Versa est plus délicate car les tests ont eu lieu dans des conditions extérieures légèrement différentes. La différence de 10 dB(A) lors de la phase d'accélération maximale est en revanche significative.

Il est à noter que le bruit au ralenti de la Chevrolet Volt en mode hybride est un peu élevé pour un véhicule hybride car, dans la configuration du véhicule, le moteur thermique peut aussi tourner à l'arrêt pour recharger les batteries. Par ailleurs, les mesures sont comparables à celles d'autres véhicules hybrides, rechargeables ou non, effectuées par un même organisme.

Les faibles niveaux de bruit émis par les véhicules électriques et hybrides rechargeables permettent de baisser le niveau sonore en milieu urbain

Le bruit produit des effets indésirables sur la santé et affecte un nombre croissant de personnes en France et en Europe. Au-delà d'un niveau d'exposition de 55 dB(A) par exemple, des éveils nocturnes peuvent être provoqués. Dès 85 dB(A), des traumatismes sonores peuvent affecter durablement l'audition. Le tableau suivant donne quelques exemples de niveaux sonores dans des environnements connus.



L'échelle du bruit

Exemples d'occurrence	
0 dB(A)	Laboratoire d'acoustique (le niveau de 0 dB(A) n'existe pas dans la nature)
25 dB(A)	Conversation à voix basse (à 1,50 m)
30 dB(A)	Chambre à coucher silencieuse
45 dB(A)	Appartement normal
60 dB(A)	Conversation normale
70 dB(A)	Rue à gros trafic
75 dB(A)	Aspirateur
80 dB(A)	Aboiements
90 dB(A)	Tondeuse à gazon (moteur à essence)
105 dB(A)	Niveau sonore maximal autorisé dans les discothèques
120 dB(A)	Réacteur d'avion (à quelques mètres)

Source : ministère du Travail, de l'Emploi et de la Santé

En France, le niveau sonore maximal autorisé pour les bâtiments d'habitation ainsi que les établissements d'enseignement et de santé à proximité d'une route a été fixé par arrêté du 4 avril 2006 (relatif à l'établissement des cartes de bruit et des plans de prévention du bruit dans l'environnement) à une moyenne de 68 dB(A) avec une moyenne de nuit de 62 dB(A)¹. Ces niveaux sont souvent dépassés : on peut par exemple estimer qu'en Île-de-France, 20 % de la population est potentiellement exposée à des niveaux sonores trop élevés².

♡ **Valeurs limites du niveau sonore de véhicules en marche : voitures et camions**

Catégories de véhicules	Valeurs limites exprimées en dB(A)
2.1.1. Véhicules destinés au transport de personnes pouvant comporter au maximum neuf places assises, y compris celle du conducteur	74
2.1.2. Véhicules destinés au transport de personnes comportant plus de neuf places assises, y compris celle du conducteur, et ayant une masse maximale autorisée de plus de 3,5 tonnes et :	
2.1.2.1. avec un moteur d'une puissance inférieure à 150 kW	78
2.1.2.2. avec un moteur d'une puissance égale ou supérieure à 150 kW	80
2.1.3. Véhicules destinés au transport de personnes comportant plus de neuf places assises, y compris celle du conducteur ; véhicules destinés au transport de marchandises :	
2.1.3.1. ayant une masse maximale autorisée n'excédant pas 2 t	76
2.1.3.2. ayant une masse maximale autorisée supérieure à 2 t mais n'excédant pas 3,5 t	77
2.1.4. Véhicules destinés au transport de marchandises ayant une masse maximale autorisée supérieure à 3,5 t :	
2.1.4.1. avec un moteur d'une puissance inférieure à 75 kW	77
2.1.4.2. avec un moteur d'une puissance égale ou supérieure à 75 kW mais inférieure à 150 kW	78
2.1.4.3. avec un moteur d'une puissance égale ou supérieure à 150 kW	80

Source : directive 70/157/CEE - 1970L0157 - FR - 05.07.2007 - 016.001 - 5

[1] Le calcul de ces indicateurs est conforme à la directive 2002/49/CE relative à l'évaluation et à la gestion du bruit dans l'environnement.

[2] Toutes sources de bruit des transports confondues.

Pour limiter ces bruits, de nombreuses mesures peuvent être prises. Les plus efficaces consistent à limiter le bruit à la source, ce qui pour les véhicules se décide au niveau européen. Le bruit extérieur émis par les voitures et les camions est réglementé par la directive 70/157/CEE (concernant le rapprochement des législations des États membres relatives au niveau sonore admissible et au dispositif d'échappement des véhicules à moteur) qui prévoit, dans sa version actuelle, des niveaux sonores résumés dans le tableau précédent.

Pour vérifier les émissions sonores des véhicules, on fait rouler le véhicule à 50 km/h puis on le fait accélérer au maximum pendant vingt mètres. Les émissions sonores maximales lors de cette accélération sont alors choisies. Cette procédure est décrite dans le règlement 51 de la CEE/ONU.

Dans certains cas, des dépassements d'un ou deux décibels sont autorisés, par exemple pour certaines voitures sportives. On remarquera les émissions sonores des gros camions qui peuvent être significativement plus élevées que celles des véhicules particuliers, et ainsi entraîner des gênes pour les personnes vivant à proximité de routes fréquentées par ces transporteurs. Si les camions sont cantonnés en général aux axes routiers principaux, les deux-roues circulent partout et sont concernés par une réglementation spécifique, la directive 97/24/CE (relative à certains éléments ou caractéristiques des véhicules à moteur à deux ou trois roues), qui fixe les limites d'émissions sonores récapitulées dans le tableau suivant.

✿ **Valeurs limites du niveau sonore de véhicules en marche : deux et trois roues**

Catégories de véhicules	Valeurs limites exprimées en dB(A)
Cyclomoteurs	
deux roues $\leq 25 \text{ km/h}$	66
deux roues $> 25 \text{ km/h}$	71
trois roues	76
Motocycles	
$\leq 80 \text{ cm}^3$	75
$> 80 \leq 175 \text{ cm}^3$	77
$> 175 \text{ cm}^3$	80
Tricycles	
	80

Source : directive 97/24/CE — 1997L0024 — FR — 07.09.2009 — 007.001 — 418

La procédure prévue pour les deux et trois roues est similaire à celle décrite plus haut pour les autres véhicules. On note que les plus gros motocycles peuvent émettre autant de bruit que les plus gros camions, c'est-à-dire 80 dB(A).

Les motocycles sont par ailleurs soumis à des mesures d'émissions sonores à l'arrêt, qui ont la particularité de ne pas être limitées. Ainsi, les papiers de certains motocycles sportifs mentionnent des émissions sonores à l'arrêt bien supérieures à 80 dB(A), comme la BMW S 1 000 RR qui, en marche selon la procédure décrite, est exactement à 80 dB(A) mais atteint 103 dB(A) à l'arrêt selon les mesures officielles, et peut dépasser ces valeurs dans certaines conditions. Une réglementation plus homogène pour tous les types de véhicules pourrait certainement bénéficier aux personnes concernées par la pollution sonore.

À vitesse élevée, une grande partie des émissions sonores est aussi produite par les pneus. L'Union européenne a prévu, à travers le règlement (CE) 1222/2009 (sur l'étiquetage des pneumatiques en relation avec l'efficacité en carburant et d'autres paramètres essentiels), de labelliser tous les pneus neufs, le label comportant entre autres une information sur leur niveau sonore.

À basse vitesse, le bruit du moteur est prépondérant et le développement de véhicules électriques et hybrides rechargeables pourrait contribuer à diminuer la pollution sonore en milieu urbain. La procédure d'essai décrite ci-dessus s'effectue principalement à des vitesses plus élevées, où les bruits du vent et surtout des pneus peuvent masquer le bruit du moteur : l'avantage mesuré lors de l'homologation de véhicules électriques et hybrides rechargeables est alors très faible. Ainsi, la Smart Electric Drive affiche un bruit extérieur en mesure normalisée de 69 dB(A), alors que certaines de ses sœurs thermiques atteignent 70 dB(A). Pour tenir compte de façon adéquate des diminutions des émissions sonores liées aux véhicules, une adaptation des procédures standardisées pourrait être envisagée.

Paradoxalement, l'absence de bruit pourra poser des problèmes de sécurité, en particulier pour les piétons qui risquent de ne pas entendre arriver le véhicule. À très basse vitesse, cette problématique affecte aussi les véhicules hybrides non rechargeables. Certains constructeurs ont déjà réagi et proposent des émetteurs de sons pour leurs véhicules : Toyota, pour la Prius (véhicule hybride non rechargeable dans sa version actuelle) vendue au Japon, Nissan, pour la Leaf (tout électrique). Le niveau sonore des bruits synthétiques restera en général en deçà des niveaux sonores de véhicules thermiques. Ces bruits

seront par ailleurs perceptibles à l'extérieur mais ne s'entendront pas ou peu à l'intérieur des véhicules.

Pour l'instant, les constructeurs semblent s'accorder sur des bruits extérieurs ressemblant à des bruits de moteur électrique amplifiés. Avec un nombre croissant de véhicules électriques et hybrides sur les routes, il faudra harmoniser et réglementer ces bruits pour éviter de créer une nouvelle nuisance sonore au lieu de la combattre. Les États-Unis ont déjà décidé d'étudier la question, grâce au « Pedestrian Safety Enhancement Act » qui vise notamment à permettre aux personnes malvoyantes de se déplacer de façon autonome.

Le véhicule électrique est-il plus économique que le thermique ?

1 ■ Le prix d'achat et les coûts d'utilisation restent un facteur déterminant de succès pour un modèle

Juger de la pertinence d'acquérir un véhicule électrique est un exercice délicat, tant l'achat d'un véhicule est une décision qui ne relève pas seulement de la rationalité économique. Le choix repose sur de nombreux critères, dont certains sont très éloignés du simple besoin de déplacement, comme le confort, l'autonomie, le marquage social, le volume disponible pour les bagages, la facilité d'entretien, etc. Ces critères, pour autant qu'ils soient quantifiables économiquement, ne sont pas abordés ici. Quelle valeur attribuer à l'angoisse de la panne sèche¹ ou au souci de manier quotidiennement un câble de recharge-ment ? Plus généralement, l'impact de l'introduction du VE sur les pratiques de mobilité n'est pas pris en compte, même si une analyse du projet Autolib' est esquissée en fin de chapitre.

Néanmoins, dès que l'on sort des marchés de niche (véhicules de flotte, à usage professionnel, véhicules de luxe ou de prestige), les coûts d'utilisation sont souvent le facteur orientant un achat et restent déterminants pour le succès commercial d'un nouveau modèle, surtout s'il est destiné au marché de masse.

La quantification recherchée dans ce chapitre repose sur une équivalence du service rendu par un VE et un modèle thermique, au kilomètre parcouru. C'est le type de comparaison généralement retenu dans les diverses études publiées récemment, qui sont réalisées en se plaçant du côté de l'utilisateur. Dans un souci de montrer la rentabilité du VE, ces études utilisent souvent les hypothèses les plus favorables, aidées en cela par le peu de retours

[1] Les Américains emploient le terme de « *range anxiety* ».

d'expérience et de données chiffrées résultant d'essais effectués par des opérateurs indépendants.

La question des émissions de CO₂ est aussi traitée dans ce chapitre, le sujet étant connexe aux aspects économiques. Parler du VE comme d'un véhicule à zéro émission est vrai localement, mais pas globalement. Quantifier l'intérêt d'émettre des polluants locaux dans des centrales électriques plutôt qu'au cœur des villes a donné lieu à une abondante littérature non évaluée ici. En revanche, la production d'électricité étant une source de pollution, une évaluation de l'impact que pourrait avoir l'introduction des VE sur ces émissions de CO₂ est effectuée.

2 ■ Prix des batteries, kilométrage annuel, prix de l'énergie et taux d'actualisation sont les paramètres déterminants

La méthode retenue est celle du coût annuel moyen d'utilisation. Celui-ci comprend les annuités correspondant à l'investissement, équivalentes au montant remboursé annuellement si un emprunt a été contracté pour couvrir l'achat du véhicule et des batteries. S'y ajoutent les dépenses courantes de carburant ou d'électricité et d'entretien. En divisant cette somme par le nombre moyen de kilomètres annuels parcourus, on obtient le coût moyen du kilomètre parcouru. Le choix des valeurs retenues pour les paramètres principaux est détaillé ci-après.

Un prix des batteries encore élevé et une durée de vie incertaine

La capacité des batteries relève du compromis que fait le constructeur entre offre d'autonomie et prix. Sur la base des modèles existants, l'hypothèse retenue est une moyenne, de l'ordre d'une vingtaine de kWh.

Exemples d'autonomies et de consommations affichées par les constructeurs

Modèle	Batterie	Autonomie	Consommation
BMW MiniE	Li-ion 32 kWh	200 km	16 kWh/100 km
Leaf de Nissan	Li-ion 24 kWh	160 km	15 kWh/100 km
Renault Fluence	Li-ion 22 kWh	160 km	13,8 kWh/100 km
Peugeot iOn, Citroën C-ZERO, i-Miev de Mitsubishi	Li-ion 16 kWh	130 km	12,3 kWh/100 km
UC de Rinspeed [équivalente de la Fiat 500]	Li-ion 12 kWh	105 km à une vitesse moyenne de 75 km/h	11,4 kWh/100 km

Les coûts les plus communément avancés pour les batteries aujourd’hui sont de 700 à 800 euros/kWh (environ 1 000 à 1 200 dollars aux États-Unis) sans que l’on sache très bien si ces coûts sont ceux que payent les constructeurs (hors taxes) ou s’il s’agit de la part correspondant aux batteries payée par l’acquéreur du véhicule (toutes taxes incluses). Selon l’interprétation, les prix peuvent varier du simple au double, à la fois pour tenir compte des coûts d’intégration des batteries par le constructeur, de ses marges et de l’effet des taxes. L’hypothèse actuelle est de 700 euros HT par kWh dans le premier cas, et de 1 000 euros TTC pour le client final.

Les gains à attendre viennent principalement des forts volumes de production escomptés, mais une partie du prix des batteries ne dépend pas des quantités produites, ce qui limite les baisses possibles. À l’horizon 2020 retenu comme hypothèse de moyen terme, les coûts sont supposés être divisés par deux, soit 350 euros HT par kWh pour le constructeur et 500 euros TTC pour le client final. Toujours pour 2020, une autre hypothèse optimiste est retenue, avec un prix de 350 euros TTC pour le client final.

La durée de vie des batteries est sans doute l’hypothèse pour laquelle l’incertitude est la plus grande, tant le manque de recul est important, malgré les projections et les tests de vieillissement qui ont pu être menés. L’incertitude tient au nombre de cycles, aux modes d’utilisation et de chargement, mais aussi au vieillissement des composants, pour lesquels il n’existe pratiquement aucun retour d’expérience. Le premier chapitre à répertorier les éléments qui contribuent à diminuer leur durée de vie dans les usages de mobilité, comme la fréquence des arrêts-démarrages, le nombre de recharges incomplètes, le type de conduite (agressive ou non), la tension de charge et en particulier le nombre de charges rapides. Compte tenu de ces incertitudes, l’hypothèse de référence de cette étude est de huit ans. C’est la durée de garantie que Nissan applique pour les batteries de sa Leaf¹.

[1] Certains analystes évoquent la possibilité de réutiliser les batteries de VE pour des usages stationnaires, leur offrant ainsi une « seconde vie ». Avant d’en arriver au recyclage proprement dit, on pourrait ainsi envisager une prolongation de leur utilisation, malgré une diminution de leurs performances énergétiques. Après désassemblage et reconstitution – opérations dont le coût est encore inconnu – les batteries pourraient être affectées à d’autres usages comme le stockage stationnaire dans les réseaux électriques afin de mieux gérer les énergies intermittentes (éolienne, solaire, etc.). Certains observateurs imaginent même qu’elles puissent être réutilisées dans des VH – sous réserve qu’elles acceptent encore les appels de puissance importants nécessaires dans ce type de traction –, des VE exploités sur de plus courtes distances (service dégradé) ou dans des deux-roues électriques. Ces possibilités ont conduit les constructeurs automobiles à nouer des alliances dans le but d’évaluer un marché encore immature, mais qui pourrait un jour s’avérer porteur. Nissan Motors et Sumitomo Corporation ont créé une entreprise

Le kilométrage annuel doit être important alors qu'il est nécessairement limité par la faiblesse de l'autonomie

D'investissement élevé, les VE doivent être utilisés intensivement pour accéder à la rentabilité économique. Pour cette raison, les études publiées qui cherchent à prouver l'équivalence économique entre VE et VTh retiennent souvent des hypothèses de distance annuelle moyenne parcourue de 13 000 km à 18 000 km par an.

D'un autre côté, pour montrer que la faible autonomie des VE n'est pas un inconvénient, les promoteurs du VE soulignent que la majorité des parcours effectués en voiture font moins de 4 km. Mais ces petites distances cumulées ne rivalisent pas avec des grands parcours et, s'il est vrai que de nombreux véhicules parcourront 15 000 km par an en France, la majorité de ces kilomètres est associée à de grandes distances, excluant *a priori* la traction électrique.

Si l'on écarte les systèmes d'échange rapide de batteries (de type « *quick drop* »)¹, les VE sont considérés comme ne pouvant pas effectuer de longs parcours et sont limités aux usages urbains et périurbains. Dans ce cas, une comparaison équitable doit être faite avec un véhicule thermique typiquement urbain, dont la consommation sera moins élevée que celle d'une routière.

Un kilométrage annuel conséquent réalisé avec uniquement des distances quotidiennes inférieures à 100 km correspond à des usages bien précis, surtout s'il faut tenir compte des durées de charge. Typiquement, les flottes d'entreprise semblent bien adaptées à ce type d'usage : tournée des véhicules de La Poste, de livreurs, de techniciens de maintenance, etc. Dans ces cas, un kilométrage annuel de 13 000 km (soit 260 jours fois 50 km) semble plausible. Des variantes seront effectuées avec des distances inférieures.

commune ayant pour objectif de développer des applications pour la seconde vie des batteries lithium-ion. C'est également le cas pour General Motors et son partenaire ABB.

[1] Tels que ceux promus par Better Place et qui peuvent être un moyen pour les VE de parcourir de longues distances. Avant que de telles solutions soient déployées, de nombreux détails techniques devront être réglés (normalisation, systèmes d'échange, etc.), mais c'est surtout le modèle économique qui rend perplexe, le coût d'une station étant évalué à 1,2 million d'euros et le fournisseur devant disposer d'un stock de batteries important, immobilisé pendant les recharges et donc de capacités financières conséquentes.

La consommation en électricité du VE dépend fortement de l'usage et du type de conduite

Le chapitre 2 consacré aux performances du VE a déjà abordé cette question. Rappelons que Renault annonce pour son VE Fluence une consommation de 13,8 kWh/100 km alors que l'équivalent thermique diesel, la Fluence DCi, est donné pour 4,4 l/100 km en cycle mixte. La Nissan Leaf pourrait parcourir 160 km avec les 24 kWh contenus dans les batteries, soit 15 kWh/100 km, mais le constructeur reconnaît que ce chiffre est extrêmement optimiste. L'exemple le plus remarquable est celui de Peugeot, dont la iOn est théoriquement déjà disponible : sa consommation en cycle normalisé correspond à une autonomie de 140 km, mais le constructeur reconnaît qu'il vaut mieux compter sur 70 km dans certaines conditions d'utilisation.

Une consommation de 20 kWh/100 km pour la traction seule apparaît comme une hypothèse raisonnable. On notera que la consommation joue moins sur le bilan économique du VE que sur son autonomie, c'est-à-dire sur sa commodité d'usage, qu'il est difficile de quantifier.

La consommation des accessoires fait débat mais la valeur de 2 kW en moyenne apparaît très plausible. Elle dépend du temps passé dans le véhicule et non de la distance parcourue. Le VE étant plutôt par nature destiné à circuler en ville, où la vitesse moyenne d'un véhicule est inférieure à 10 km/h, par temps froid et pluvieux la consommation des accessoires pourra très largement dépasser celle nécessaire à la traction. Dans les comparaisons chiffrées entre VE et VTh, seule la consommation du chauffage est comptabilisée, celle des autres auxiliaires étant similaire pour les deux types de véhicules, et établie à 1 kW en moyenne annuelle. L'autonomie théorique calculée ne tient pas compte des consommations des autres accessoires et devra être significativement revue à la baisse si le véhicule est climatisé.

En charge lente, les batteries lithium-ion ont un rendement de charge/décharge d'environ 90 %, les pertes thermiques pouvant être bien supérieures en cas de charge rapide (laquelle peut dégrader la batterie). Se plaçant du point de vue de l'utilisateur, ces pertes sont entendues comme étant celles de « la prise à la roue ».

Le VTh auquel est comparé le VE doit être de même type et avoir les mêmes performances. Le VE étant dédié aux déplacements urbains pour des raisons d'autonomie, la consommation retenue est de 4,6 l/100 km de gazole.

Les prix de référence pour les carburants et l'électricité sont ceux de début 2011

En France, le prix de l'électricité pour un client domestique était début 2011 d'environ 0,12 euro/kWh, prix qui inclut une partie de l'abonnement. L'ajout d'une prise dédiée à la recharge du véhicule (« *wall box* ») nécessite vraisemblablement une augmentation de la puissance souscrite. Les frais associés à l'installation de cette prise et/ou à l'éventuelle mise en conformité de l'installation électrique de l'utilisateur ne sont pas comptabilisés. Concernant les recharges en zones publiques (ou privées), n'est pas non plus intégré le fait que le prix du kWh devra inclure les coûts des infrastructures et n'aura plus rien à voir avec celui du kWh délivré au domicile.

Les calculs ont été réalisés avec un prix de gazole de 1,30 euro, qui avait cours début 2011. L'impact d'un prix plus élevé peut se déduire des diverses variantes effectuées.

En 2020, les progrès techniques sur les moteurs thermiques font retenir une consommation qui descend à 3,5 litres, mais pour un prix de gazole qui a augmenté pour atteindre 1,60 euro/litre (*voir annexes 2 et 3*). L'électricité voit également son prix s'élever à 0,15 euro/kWh.

Un taux d'actualisation identique pour le VTh et le VE, même si ce dernier est porteur d'une part de risque plus importante

Certaines études n'actualisent pas leurs calculs, ce qui constitue une faute économique car cela revient à mettre sur le même plan une dépense effectuée aujourd'hui et une dépense qu'on effectuera dans le futur. Le taux d'actualisation retenu de 6 % est supérieur aux taux d'emprunt que l'on peut actuellement trouver sur les marchés mais correspond aux 4 % (hors risque) préconisés dans un rapport du Commissariat général du Plan¹, une part de risque inhérente à toute nouvelle technologie ayant été ajoutée, évaluée à 2 points. Lorsqu'on choisit le même taux pour le véhicule thermique, ce dernier se voit légèrement défavorisé.

[1] Commissariat général du Plan [2005], *Révision du taux d'actualisation des investissements publics*, rapport du groupe d'experts présidé par Daniel Lebègue.

Un prix du VE hors batteries identique à terme à celui du VTh de caractéristiques identiques

Dans un proche avenir, le VE sans les batteries aura un coût comparable à celui du VTh. Actuellement, ce n'est pas exact, le coût d'un moteur électrique étant encore deux fois supérieur à celui d'un moteur thermique¹, mais les constructeurs espèrent atteindre la parité rapidement grâce aux effets de série, et même descendre sous ce prix. Pour certains constructeurs et grands équipementiers, le véhicule électrique sera à terme, hors batterie et à niveau de production en série identique, structurellement moins cher que le véhicule thermique. En effet, de nombreux composants disparaissent (système d'échappement, équipements associés au moteur thermique, etc.) ou leur part relative diminue (moteur lui-même, organes mécaniques, boîte de vitesses et différentiel, système de freinage, insonorisation, etc.).

Cet horizon demeurant indéterminé, est retenu ici un prix identique pour le VTh et le VE sans batteries, le véhicule de référence étant choisi avec une taille moyenne et son coût fixé à 16 000 euros. La valeur de revente du véhicule est calculée avec l'hypothèse qu'il se déprécie de 20 % chaque année (décroissance exponentielle).

3 ■ Les coûts de revient kilométriques du VE et du VTh ne sont comparables qu'à une double condition

L'évaluation pour un véhicule électrique est effectuée dans les conditions économiques actuelles, avec et sans la subvention de 5 000 euros, puis dans les conditions de 2020. À cette date, la subvention ne sera plus accordée. Un jeu d'hypothèses « optimistes » pour 2020 a été ajouté, avec un prix de batteries de 350 euros/kWh.

Le détail du calcul effectué avec ces hypothèses est fourni dans le tableau suivant. On remarque que l'équivalence économique entre VE et VTh ne peut être atteinte qu'à une double condition : une distance moyenne parcourue de 15 000 km par an et un prix de batteries proche de 300 euros/kWh. Des hypothèses moins favorables au VE dégradent sa rentabilité et des scénarios de sensibilité à chacun des paramètres déterminants sont présentés dans le paragraphe suivant.

[1] Voir interview de Thierry Koskas, directeur du programme Véhicule électrique de Renault, « Pourquoi Renault croit à l'avenir de la voiture électrique », *Les Échos*, 29 octobre 2010.

♡ **Coût de revient du kilomètre parcouru (VE)**

	Hypothèses actuelles	Prospective 2020	
		Batterie à 500 €	Batterie à 350 €
Véhicules			
Durée d'utilisation	10 ans	10 ans	10 ans
Coût du véhicule	16 000 €	16 000 €	16 000 €
Valeur de revente (20 % perte/an)	1 718 €	1 718 €	1 718 €
Annuité investissement	2 044 €	2 044 €	2 044 €
Batteries			
Durée de vie	8 ans	10 ans	10 ans
Coût de la batterie	1 000 €/kWh	500 €/kWh	350 €/kWh
Capacité de la batterie	20,0 kWh	25,0 kWh	25,0 kWh
Coût total de la batterie	20 000 €	12 500 €	8 750 €
Annuité	3 221 €	1 698 €	1 189 €
Électricité			
Nombre de km/an électrique	13 000 km	13 000 km	13 000 km
Prix de l'électricité	120 €/MWh	150 €/MWh	150 €/MWh
Conso, électricité - traction /100 km	18 kWh	18 kWh	18 kWh
Consommation du chauffage	1,0 kW	1,0 kW	1,0 kW
Vitesse moyenne	20 km/h	20 km/h	20 km/h
Consommation totale /100 km	23 kWh	23 kWh	23 kWh
Pertes à la charge des batteries	10 %	8 %	8 %
Consommation à la prise électrique	25,3 kWh	24,8 kWh	24,8 kWh
Coût de l'électricité par an	395 €	484 €	484 €
Maintenance par an	400 €	400 €	400 €
Bilans			
Dépenses annuelles totales	6 059 €	4 626 €	4 117 €
Coût au km	0,466 €	0,356 €	0,317 €

Source : CAS

⌚ **Coût de revient du kilomètre parcouru (VTh)**

	Hypothèses actuelles	Prospective 2020
Véhicule		
Durée d'utilisation	10 ans	10 ans
Coût du véhicule	16 000 €	16 000 €
Valeur de revente (20 % perte par an)	1 718 €	1 718 €
Annuité investissement	2 044 €	2 044 €
Consommation carburant fossile		
Nombre de km/an	13 000 km	13 000 km
Prix du carburant	1,30 €/l	1,60 €/l
<i>dont TIPP</i>	0,60 €/l	0,60 €/l
Consommation carburant /100 km	4,6 l	3,5 l
Coût de fossile par an	777 €	728 €
<i>dont TIPP</i>	359 €	273 €
Maintenance par an	800 €	800 €
Dépenses annuelles totales	3 621 €	3 572 €
Coût au km	0,279 €	0,275 €

Source : CAS

4 ■ La compétitivité du VE se dégrade rapidement si l'on s'écarte des hypothèses de référence

Le prix de la batterie est difficilement compensé par un coût de fonctionnement moindre

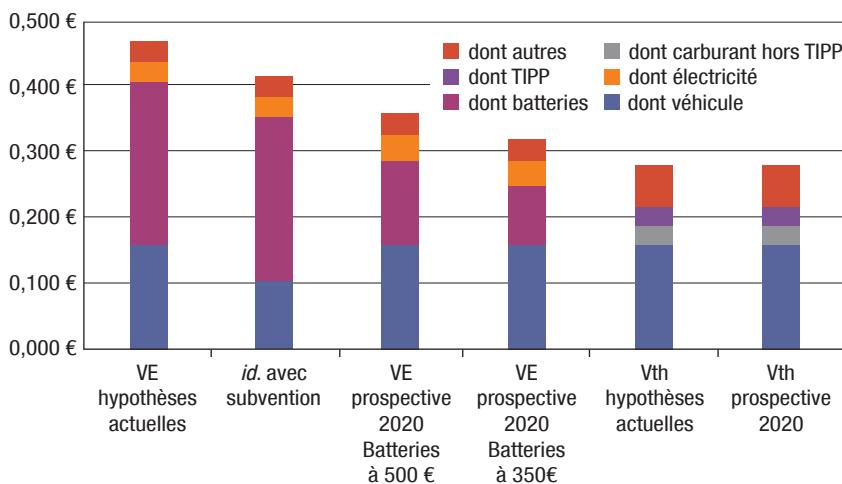
Les deux graphiques suivants représentent le coût de revient du kilomètre pour chaque scénario avec la décomposition de ce coût, dans les deux hypothèses de distance annuelle moyenne parcourue, 13 000 et 8 000 km. On constate que, même avec les hypothèses les plus favorables, le VE peine à être compétitif. À prix de véhicule égal entre VE (hors batterie) et VTh, le coût de la batterie est difficilement compensé par un coût de fonctionnement moindre (carburant et maintenance). En effet, la part du carburant dans le véhicule diesel compte pour moins de 20 % du coût total (0,06 euro/km sur 0,279 euro/km) et le coût

de la consommation d'électricité n'est pas négligeable¹ (0,03 euro/km). Cet écart se réduit encore en 2020, une diminution de la consommation des véhicules thermiques étant prévisible, tandis que le carburant et l'électricité voient leur prix progresser².

La question de la taxe intérieure pour les produits pétroliers (TIPP), à laquelle n'est pas assujetti le kWh électrique, étant souvent posée, elle apparaît explicitement dans les graphiques. En se fondant sur le niveau actuel de 0,60 euro/litre, cette taxe correspond à 0,028 euro par kilomètre parcouru, ce qui équivaut à la part électricité pour le VE et la part carburant fossile pour le véhicule thermique hors TIPP.



Décomposition du coût de revient au km pour un VE et un VTh 13 000 km/an



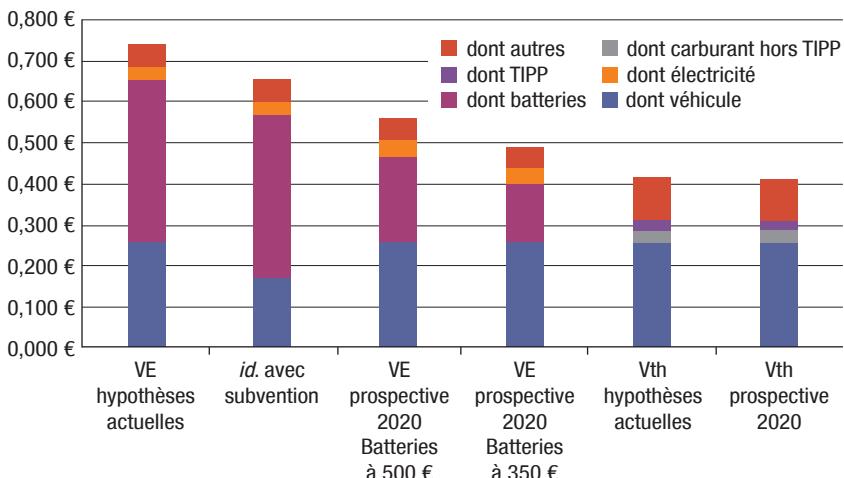
Source : CAS

[1] Peugeot a vanté dans une publicité pour la iOn qu'on pouvait faire « le plein pour 3,29 € ». Cette annonce apparaît attrayante, le plein d'un VTh de même catégorie revenant à environ 20 fois cette somme. Mais c'est passer sous silence que dans le premier cas, le plein permet de parcourir de 70 à 100 km, et dans le deuxième près de 10 fois plus.

[2] Rappelons que le coût de l'installation de la prise dédiée chez les particuliers, qui peut dépasser le millier d'euros, n'est pas intégré dans les calculs. Il peut cependant pénaliser assez fortement le VE : un souci de 1 200 euros correspond à une consommation de 10 000 kWh, soit la quantité d'énergie permettant à un VE de parcourir environ 50 000 km.



Décomposition du coût de revient au km pour un VE et un VTh (8 000 km/an)



Source : CAS

La politique fiscale appliquée aux prix de l'électricité et du carburant peut bouleverser la comparaison économique du VE et du VTh

Ces prix sont très variables d'un pays à l'autre, en raison des taxes en vigueur mais aussi des coûts de production locaux de l'électricité. En France, l'essence et dans une moindre mesure le gazole sont fortement taxés, l'électricité ne l'est pas (sauf TVA). Les charges supplémentaires qui devront être appliquées à l'électricité délivrée dans les lieux publics ou pour l'usage des VE n'ont pas encore fait l'objet de débats.

La conception d'un véhicule nouveau recherchant un amortissement sur un marché très large, elle doit en général tenir compte des besoins spécifiques de pays très divers. Des comparaisons entre pays n'ayant pas la même structure de coût et les mêmes taxes que la France – Chine, États-Unis, Japon, Corée – ont été réalisées à cette fin avec les hypothèses de référence.

Compte tenu des points soulevés dans le rapport, trois hypothèses d'autonomie sont retenues : 80, 100 et 120 km (rappelons que la batterie a une capacité de 20 kWh et que les pertes à la charge sont de 10 %). Les résultats publiés ne concernent que les coûts de fonctionnement (carburant ou électricité), considérant *a priori* que toutes les autres charges seraient identiques. Le calcul réalisé consiste en de simples multiplications.

Pour le Japon et la Corée, les données ont été transmises par le Service économique de l'Ambassade de France de ces pays. Pour les États-Unis, les données sur les prix des énergies sont en ligne sur le site du DOE et celles de l'État de New York ont été retenues, le VE étant *a priori* destiné aux sites urbains et denses. Pour la Chine, les données ont été fournies par la représentation d'EDF à Pékin.

Aux États-Unis et en Corée, l'électricité – chère et/ou fortement taxée – n'apporte aucun bénéfice économique en fonctionnement par rapport au carburant. Au Japon, l'équilibre dépend de l'autonomie. L'intérêt n'apparaît clairement qu'en France et encore plus en Chine, où l'électricité est très bon marché.

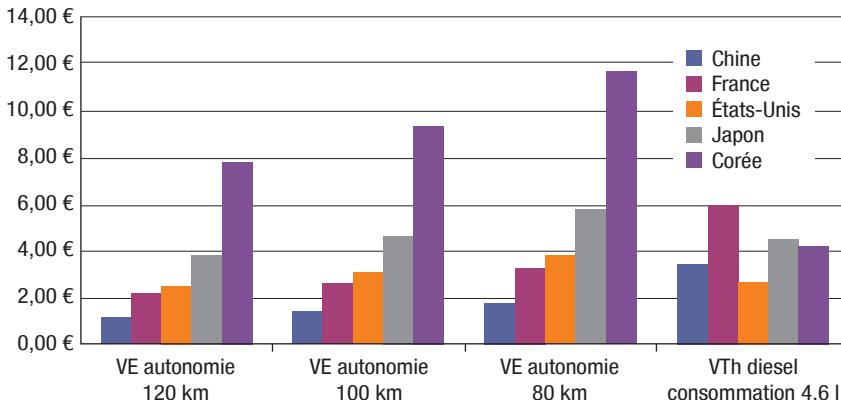
✿ **Prix des énergies pratiqués en France, au Japon, en Chine, en Corée et aux États-Unis**

	France	Japon (TEPCO)	Chine (Shangaï)	Corée	États-Unis (New York)
Litre de gazole	1,30 €	0,98 € (112 yens)	0,75 € (7 RMB)	0,98 € (1 430 wons)	0,58 € (3,06 \$ le gallon) Le prix de l'essence est inférieur à 2,8 \$
1 kWh	0,12 €	0,211 € (24,13 yens)	0,066 € (0,617 RMB)	0,42 € (656 wons)	0,14 € (0,196 \$) au-delà de 300 kWh de consommation mensuelle, ce qui est estimé être le cas. Le prix de l'abonne- ment n'est pas compris.

Source : CAS



Coûts de carburant/électricité pour un VE et un VTh dans différents pays pour 100 km parcourus



Source : CAS

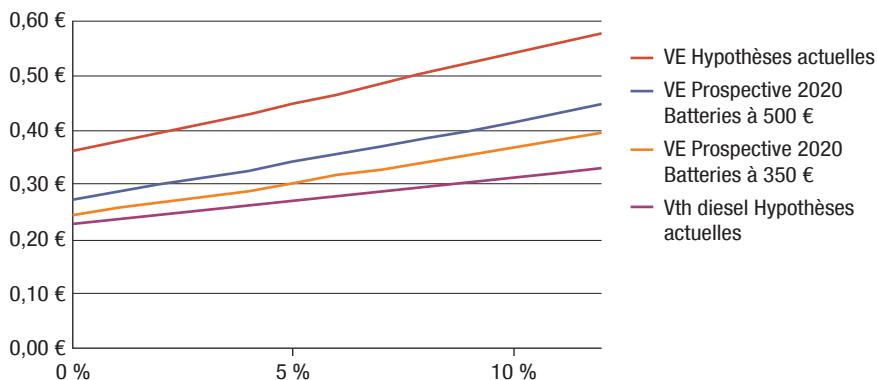
Le véhicule électrique peut apparaître comme une bonne protection contre un prix du baril de pétrole qui s'envolerait. C'est oublier que près des trois quarts de l'électricité mondiale sont produits à partir de combustibles fossiles, principalement charbon et gaz, dont les prix sont plus ou moins corrélés de fait à celui du pétrole. Il ne faut donc pas sous-estimer l'augmentation du prix de l'électricité qui serait concomitante, sous l'effet d'une croissance renforcée de la demande d'électricité. Dans de nombreuses régions du monde, son prix est corrélé à celui des combustibles fossiles car tout surcroît de demande est satisfait par un appel à des centrales à combustible fossile (les moyens décarbonés comme le nucléaire ou les énergies renouvelables sont utilisés à des niveaux déjà proches du maximum de leurs capacités).

Les utilisateurs se focalisent sur les dépenses immédiates, d'où un taux d'actualisation implicite qui peut être très important

La sensibilité au taux d'actualisation est illustrée par le schéma suivant : avec un taux nul et des hypothèses optimistes, le VE est presque compétitif avec le véhicule diesel, mais l'écart entre les coûts de revient des deux véhicules devient de plus en plus significatif au fur et à mesure que le taux d'actualisation augmente.



Sensibilité du coût de revient au km au taux d'actualisation des véhicules électriques et thermiques



Source : CAS

Ce type d'évaluation est rarement effectué par l'utilisateur courant qui se focalise souvent sur le prix d'achat et sous-estime les coûts de fonctionnement. À titre d'exemple, les difficultés actuelles liées à la crise économique font que l'année 2009 a vu diminuer la proportion de véhicules diesel vendus¹, ceux-ci étant réputés plus chers à l'achat, mais plus économiques d'utilisation. Les véhicules *low cost* telle la Logan de Renault-Dacia, pourtant plus gourmande en carburant, connaissent à l'inverse un vif succès². Raisonner à court terme comme peut le faire un acheteur de véhicule *low cost*, souvent par nécessité car cela tient à sa capacité soit à payer, soit à emprunter, revient à prendre un taux d'actualisation implicite qui peut être très élevé (proche de 15 %) si le véhicule est très utilisé, ce qui pénalise bien entendu le VE.

Certains constructeurs comme Renault cherchent à contourner ce problème en offrant les batteries à la location, ce qui revient à porter le risque et à appliquer leur propre taux d'actualisation pour l'utilisateur. Des calculs détaillés de valeur d'actif des batteries en fonction sont présentés dans le paragraphe ci-dessous consacré à la Fluence qui peuvent montrer les limites de cette approche commerciale.

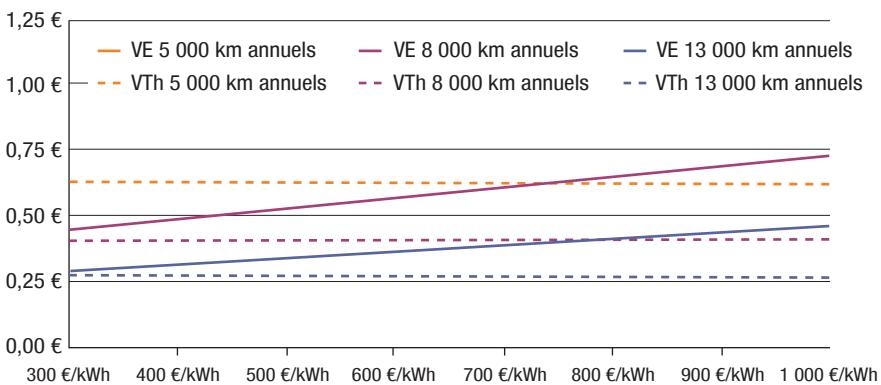
[1] D'après le CCFA (Comité des constructeurs français d'automobiles, www.ccfa.fr), la proportion est passée de 77,7 % en 2008 à 70,7 % en 2009, retrouvant son niveau de 2005.

[2] D'après *Les Échos* du 3 août 2010 citant le CCFA, Dacia a augmenté ses ventes en France de 47 % entre juillet 2009 et juillet 2010, alors que sur la même période les ventes de véhicules neufs ont baissé de 12,9 %.

Sensibilité au prix des batteries

Le prix des batteries est un paramètre de première importance dans l'évaluation du coût de revient du km parcouru en VE, et le graphique ci-dessous montre la sensibilité de ce coût au prix des batteries pour trois hypothèses de kilométrage annuel moyen.

❖ **Sensibilité du coût de revient au km au prix des batteries pour un VE**



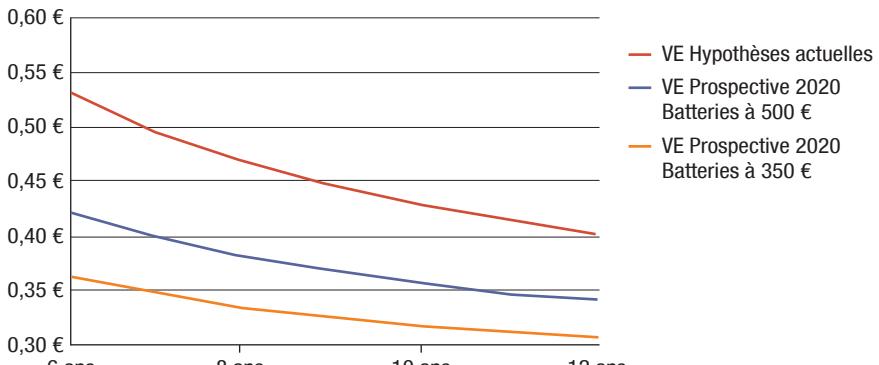
Source : CAS

Une durée de vie des batteries plus faible que prévu dégrade fortement la rentabilité du VE

L'incertitude étant de mise, un test de sensibilité a été réalisé en faisant varier de six à douze ans la durée de vie totale des batteries. Établi sur la base des hypothèses de référence, le graphique suivant montre des variations de coût de revient global du véhicule assez importantes, surtout si le coût initial des batteries est élevé. Le principe du calcul étant celui de l'amortissement d'un investissement, le taux d'actualisation retenu est crucial. Le choix d'un taux de 6 %, plutôt bas car il n'intègre qu'une faible part de risque lié à l'incertitude régnant encore sur la durée de vie réelle des batteries et leur possible réutilisation en fin de vie, se révèle plus favorable à une éventuelle seconde vie que des taux plus élevés¹.

(1) À horizon de huit ans, avec un taux d'actualisation de 6 %, la valeur actualisée d'un investissement de 100 euros est d'environ 62 euros ; avec un taux de 8 %, elle passe à 54 euros et avec un taux de 10 % à 46 euros.

♡ **Sensibilité du coût de revient au km à la durée de vie des batteries pour un VE**

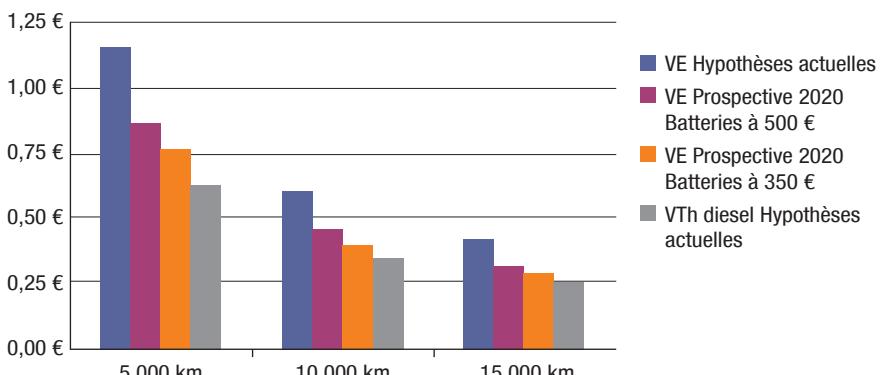


Source : CAS

Sensibilité à la distance annuelle moyenne parcourue

Un véhicule urbain peut typiquement parcourir 25 km par jour pendant près de 200 jours par an, alors qu'un véhicule de flotte en fera le triple. Le graphique ci-dessous reprend ces hypothèses et illustre l'impact de la distance moyenne annuelle parcourue sur le coût des kilomètres, toutes choses égales par ailleurs.

♡ **Sensibilité du coût de revient au kilométrage annuel parcouru pour un VE et un VTh**



Source : CAS

5 ■ La Renault Fluence ZE a un coût d'utilisation comparable à son équivalent diesel grâce au super bonus de 5 000 euros et à condition de parcourir plus de 15 000 km/an

La Renault Fluence existant à la fois avec des motorisations électrique (ZE) et diesel (Expression dCi), ces deux modèles sont simplement comparés en retenant les prix et les caractéristiques affichées par le constructeur.

⌚ Caractéristiques techniques Renault Fluence

	ZE	Expression dCi
Longueur	4,75 m	4,62 m
Poids des batteries	230 kg	
Poids total	1 543 kg	1 277 kg
Puissance	95 ch DIN	85 ch DIN
Couple	226 Nm	200 Nm
0-100 km/h	NC	13 s
Vitesse maximum	135 km/h	180 km/h

Source : constructeur

La Fluence Expression dCi a un prix affiché de 20 150 euros, pour une consommation en cycle mixte de 4,4 l de gazole aux 100 km. Son prix se déprécie de 20 % par an, soit près de 68 % en cinq ans. Sa valeur de revente à cette échéance est alors de 6 600 euros. Les annuités correspondantes (qui pourraient constituer le remboursement d'un emprunt correspondant prenant en compte la valeur de revente au bout des cinq ans) sont alors de 3 612 euros (300 euros/mois). Les charges annuelles fixes retenues sont de 400 euros et les charges variables de 1 000 euros/an pour un véhicule parcourant 15 000 km/an.

La Fluence ZE sera vendue 21 300 euros, une fois déduit le bonus gouvernemental de 5 000 euros. Les batteries seront proposées à la location pour un prix minimum de 79 euros/mois¹ pendant trois ans, sans que les conditions de continuation du contrat soient encore précisées. Elles sont ainsi prolongées jusqu'à huit ans dans les calculs ci-dessous. Une forte incertitude pesant sur

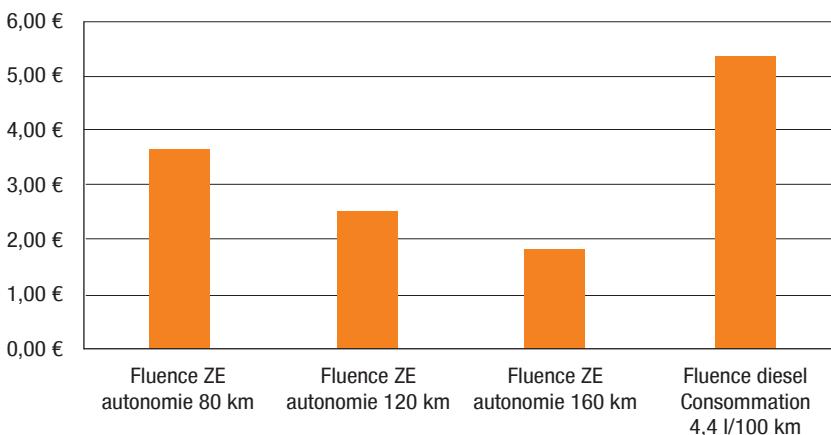
[1] Ce prix devrait être supérieur si l'utilisation du véhicule est importante ou si des recharges rapides sont effectuées, ce qui augmenterait d'autant les coûts d'utilisation évalués ci-après.

LA VOITURE DE DEMAIN : CARBURANTS ET ÉLECTRICITÉ

la valeur de revente du véhicule au bout de cette période, une dépréciation de 25 % par an est appliquée, supérieure à celle de son équivalent thermique.

La consommation en cycle normalisé génère une autonomie de 160 km mais, comme pour la Peugeot iOn, on peut s'attendre à ce que la consommation constatée se situe entre 100 et 120 km, et descende même jusqu'à 80 km dans certaines conditions d'utilisation. Trois valeurs (80, 120 et 160 km) sont retenues comme scénarios. Cette distance est parcourue avec un « plein » de 22 kWh (la batterie a une capacité totale de 24 kWh, mais les deux derniers kWh ne sont jamais utilisés). En retenant une perte à la charge de 10 % et un prix de l'électricité de 120 euros/MWh, les dépenses d'électricité pour 100 km parcourus sont schématisées ci-après.

⌚ Dépenses de carburant/électricité pour 100 km

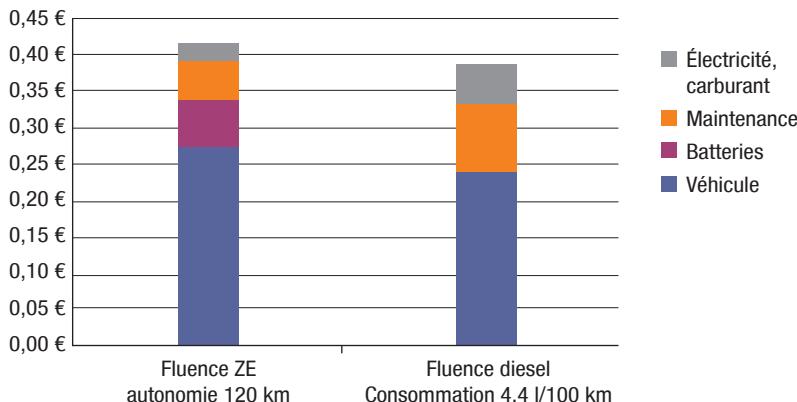


Source : CAS

Les dépenses en électricité ne sont donc pas aussi négligeables qu'on le dit généralement et peuvent se situer dans un rapport de 1 à 2 avec les dépenses de carburant de son homologue à essence lorsque l'autonomie est faible. Sur-tout, si l'on observe la structure du coût complet de possession de ces véhicules, représentée dans la figure suivante, apparaissent les coûts de carburant marginaux par rapport aux autres dépenses, en particulier d'investissement. On remarquera également que les dépenses de gazole restent inférieures au coût de location des batteries pour 15 000 km/an parcourus.



Coût d'utilisation des Fluence ZE et diesel Kilométrage 15 000 km/an - en euros par km



Source : CAS



Quel est le prix des batteries de la Fluence ?

Les batteries de la Fluence ne sont proposées qu'à la location mais, en appliquant un taux d'actualisation (6 %) et une certaine durée de vie, on peut estimer leur valeur d'actif correspondante, c'est-à-dire ce que doit être leur coût d'acquisition correspondant. Le calcul est modulé par l'existence d'un super bonus de 5 000 euros, dont on ne sait pas s'il s'applique au véhicule, aux batteries, ou se répartit entre les deux.

Les hypothèses sont les suivantes :

- prix de location : 79 euros/mois (948 euros/an TTC), soit celui actuellement proposé par Renault ;
- durée de vie des batteries : trois, cinq et huit ans ;
- affectation du super bonus de 5 000 euros à l'achat de la batterie : 0 %, 50 % et 100 % (le complément va au véhicule). La capacité de celle-ci étant, rappelons-le, de 24 kWh.

Le tableau suivant fournit la valeur actuelle de la batterie selon sa durée de vie et le bonus, ainsi que le prix HT auquel Renault doit *a maxima* payer ses batteries pour ne pas être déficitaire :

LA VOITURE DE DEMAIN : CARBURANTS ET ÉLECTRICITÉ

Durée de vie	Valeur actuelle TTC	Coût HT max pour Renault	Coût avec 50 % du super bonus	Coût HT max pour Renault	Coût avec 100 % du super bonus	Coût HT max pour Renault
3 ans	2 534 €	88 €/kWh	5 034 €	175 €/kWh	7 534 €	262 €/kWh
5 ans	3 993 €	139 €/kWh	6 493 €	226 €/kWh	8 993 €	313 €/kWh
8 ans	5 887 €	205 €/kWh	8 387 €	292 €/kWh	10 887 €	379 €/kWh

La valeur actuelle est celle supportée *a priori* par le client final, pour lequel le prix de location s'entend toutes charges comprises. Le coût maximum supportable par Renault pour ne pas être déficitaire est notifié hors TVA, mais il doit inclure la marge des divers fournisseurs (qui comprend le risque supporté) et le système de gestion électronique des batteries (BMS). Rappelons que le chiffre de 300 euros/kWh HT a été présenté par les experts consultés comme une limite extrême atteignable pour le coût de production des cellules, prix qui ne comprend pas le BMS et les coûts d'intégration. Il apparaît donc que, même en considérant que le super bonus est entièrement affecté à l'achat des batteries, Renault dispose d'un accès à des prix de batteries extrêmement bas, nettement inférieurs à tous ceux que les experts consultés auront communiqués.



Impact sur les recettes fiscales de la vente et de l'utilisation d'une Fluence ZE par rapport à la Fluence diesel pendant toute sa durée de vie

Le calcul détaillé ci-dessous tient compte de la TVA sur le prix du véhicule à l'achat, sur la location de la batterie, ainsi que sur la maintenance et les achats d'électricité et de la TIPP pour le VTh.

VE Fluence		VTh Fluence diesel	
<i>Durée de vie (DDV)</i>	10 ans	<i>Durée de vie</i>	10 ans
<i>Nombre de km/an</i>	15 000 km	<i>Nombre de km/an</i>	15 000 km
<i>TVA taux</i>	19,60 %		19,60 %
<i>Coût du véhicule bonus déduit</i>	21 300 €	<i>Coût du véhicule</i>	20 150 €
<i>TVA véhicule</i>	3 491 €	<i>TVA véhicule</i>	3 302 €
<i>Bonus</i>	– 5 000 €		

CHAPITRE 3

LE VÉHICULE ÉLECTRIQUE EST-IL PLUS ÉCONOMIQUE QUE LE THERMIQUE ?

location annuelle batterie	948 €	Conso, carburant /100km	4,4 l
Autonomie	120 km	Prix du carburant	1,20 €/l
VA de la batterie	6 977 €	Part TIPP	0,60 €/l
TVA sur batterie	1 143 €	TIPP par an	396 €
		TIPP sur la DDV	2 915 €
Coût de l'électricité par an	363 €		
TVA sur l'électricité sur DDV	438 €		
Maintenance par an	400 €	Maintenance par an	1 000 €
TVA maintenance sur DDV	482 €	TVA maintenance sur DDV	1 206 €
Bilan	554 €	Bilan	7 423 €

Calcul détaillé

VE Fluence				VTh Fluence diesel	
Durée d'utilisation	5 ans	Durée d'utilisation	5 ans		
Coût du véhicule bonus déduit	21 300 €	Coût du véhicule [toutes options]	20 150 €		
Valeur de revente [25 % perte/an]	5 055 €	Valeur de revente [20 % perte/an]	6 603 €		
Annuité investissement	4 160 €	Annuité investissement	3 612 €		
Batteries					
Capacité	24 kWh	24 kWh	24 kWh		
Capacité utile	22 kWh	22 kWh	22 kWh		
<i>Autonomie</i>	<i>160 kWh</i>	<i>120 km</i>	<i>80 km</i>		
<i>Coût de location annuel</i>	<i>948 €</i>	<i>948 €</i>	<i>948 €</i>		
Consommation électricité				NB	
Consommation électricité - traction/100 km	13,8 kWh	18,3 kWh	27,5 kWh	Consommation cycle urbain	5,3 l
				Consommation sur route	4,0 l
Pertes à la charge des batteries	10 %	10 %	10 %		
Consommation à la prise électrique	15,1 kWh	20,2 kWh	30,3 kWh		

Charges en électricité				Consommation carburant fossile	
Nombre de km/an électrique	15 000	15 000	15 000	Nombre de km/an thermique	15 000
<i>Nombre de km/200 jours</i>	75	75	75	Prix du carburant	1,20 €/l
Prix de l'électricité	120 €/MWh	120 €/MWh	120 €/MWh	Consommation carburant/10 km	4,4 l
<i>Coût de l'électricité par an</i>	272 €	363 €	545 €	<i>Coût de carburant par an</i>	792 €
Autres charges				Autres charges	
<i>Maintenance par an</i>	400 €	400 €	400 €	<i>Maintenance par an</i>	1 000 €
<i>Taxes fixes et divers - par an</i>	400 €	400 €	400 €	<i>Taxes fixes et divers - par an</i>	400 €
Bilan				Bilan	
Dépenses annuelles totales	6 180 €	6 271 €	6 452 €	Dépenses annuelles totales	5 804 €
Coût au km	0,412 €	0,418 €	0,430 €	Coût au km	0,387 €
<i>dont véhicule</i>	0,277 €	0,277 €	0,277 €	<i>dont véhicule</i>	0,241 €
<i>dont électricité</i>	0,018 €	0,024 €	0,036 €	<i>dont carburant</i>	0,053 €
<i>dont batteries</i>	0,063 €	0,063 €	0,063 €		

Source : CAS

6 ■ À son prix actuel, malgré le super bonus, la Peugeot iOn ne semble pas en mesure de concurrencer ses équivalents thermiques

La Peugeot iOn n'a pas vraiment d'équivalent thermique dans la gamme proposée par le constructeur. Le véhicule qui s'en approche le plus par la taille et les performances est la Peugeot 107 Trendy 5 portes essence, modèle qui peut être considéré comme plus performant et plus équipé que la iOn. Le tableau suivant résume les caractéristiques des deux véhicules.

♡ Caractéristiques techniques des Peugeot iOn et 107

	iOn	107
Longueur	3,47 m	3,43 m
Poids des batteries	230 kg	
Poids total	1 120 kg	790 kg
Puissance	64 ch DIN	68 ch DIN
Couple	18,4 mkg à 0 tr/min	93 Nm à 3600 tr/min
0-100 km/h	15,9 s	13,7 s
Vitesse maximum	130 km/h	157 km/h

Source : constructeur

L'évaluation économique, du point de vue de l'utilisateur, repose sur les strictes données du constructeur. La Peugeot iOn est proposée à la location pour 500 euros par mois pendant cinq ans, toutes charges comprises, après quoi le véhicule est récupéré par le vendeur. Le bonus gouvernemental de 5 000 euros est perçu par le constructeur à la mise à disposition du véhicule.

La consommation en cycle normalisé correspond à une autonomie de 140 km mais Peugeot reconnaît que celle-ci peut descendre à 70-80 km dans certaines conditions d'utilisation. Divers essais effectués par des journaux automobiles ou des laboratoires comme celui de l'université de Lucerne en Suisse font état d'une autonomie de 100 km. Trois valeurs (70, 100 et 140 km) sont retenues dans les calculs. Cette distance est parcourue avec un « plein » que le constructeur estime à 3,29 euros, valeur qu'il a affichée assez largement dans des publicités¹.

La Peugeot 107, dans la version Trendy 5 portes essence, a un prix affiché par le constructeur de 11 000 euros, pour une consommation en cycle mixte de 4,6 l aux 100 km. Son prix se déprécie de 20 % par an, soit 68 % en cinq ans, ce qui est conforme à l'argus automobile. Sa valeur de revente à cette échéance est alors de 3 604 euros. Les annuités correspondantes (qui pourraient constituer le remboursement d'un emprunt correspondant prenant en compte la valeur de revente au bout des cinq ans) sont alors de 1 972 euros (164 euros/mois). Les

[1] Avec un prix moyen de l'électricité de 16,45 c€/kWh en moyenne européenne [et supérieur de 30 % environ au prix français]. La capacité de la batterie étant de 16 kWh, cela sous-entend que les pertes à la charge seraient exactement de 25 %.

LA VOITURE DE DEMAIN : CARBURANTS ET ÉLECTRICITÉ

charges annuelles fixes retenues sont de 400 euros et les charges variables de 800 euros/an si le véhicule parcourt 10 000 km/an et 400 euros/an s'il parcourt 5 000 km/an.

⌚ Dépenses annuelles en électricité de la Peugeot iOn

Peugeot iOn			
Nombre de km/an électrique	10 000 km	10 000 km	5 000 km
Nombre de km/200 jours	50 km	50 km	25 km
Prix d'un plein	3,29 €	3,29 €	3,29 €
Autonomie	70 km	140 km	100 km
Coût de l'électricité par an	470 €	235 €	165 €

Source : CAS

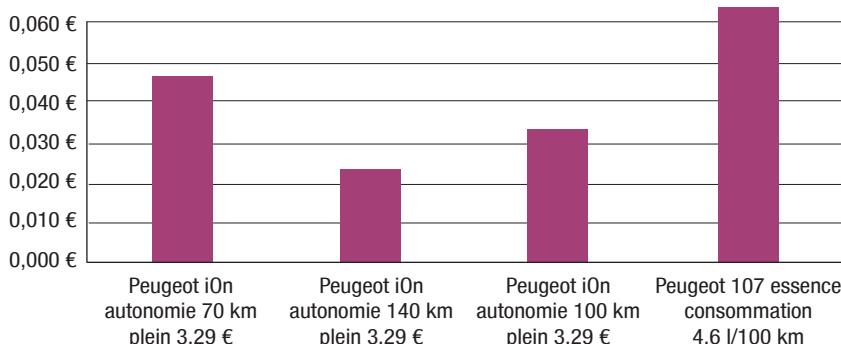
⌚ Dépenses annuelles de fonctionnement de la Peugeot 107

Peugeot 107		
Nombre de km/an thermique	10 000 km	5 000 km
Prix du carburant	1,35 €/l	1,35 €/l
Consommation carburant/100km	4,6 l	4,6 l
Coût de carburant fossile par an	621 €	311 €
Maintenance par an	800 €	400 €
Taxes fixes et divers - par an	400 €	400 €

Source : CAS

La première remarque tient dans la comparaison des coûts d'utilisation. Certes, 3,29 euros apparaît comme un prix négligeable pour effectuer le plein d'une voiture. Mais si ce plein ne permet de faire que 70 km, ou un peu plus, les dépenses annuelles en électricité ne sont plus aussi négligeables et se situent dans un rapport de 1 à 2 avec les dépenses de carburant de son homologue à essence. On est donc très loin des ratios de 1 à 10 annoncés fréquemment avec les coûts de carburant fossile correspondant. La figure suivante résume les calculs effectués.

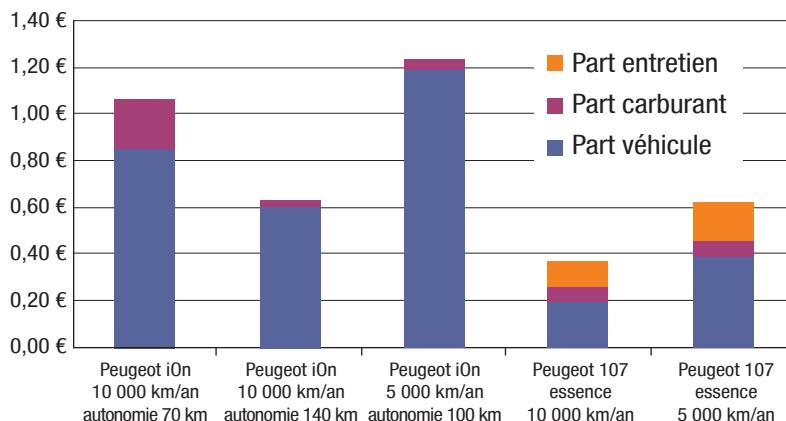
♡ **Coûts de fonctionnement comparés des Peugeot iOn (en électricité) et de la Peugeot 107 (en essence) (en euro/km)**



Source : [CAS](#)

La deuxième remarque découle de l'observation de la structure du coût complet de possession de ces véhicules, représentée dans la figure suivante. Les coûts en carburant ou électricité sont en effet marginaux par rapport aux annuités correspondant à l'investissement réalisé. En ce sens, comme vu précédemment, le kilométrage annuel parcouru est un paramètre fondamental pour accéder à une certaine rentabilité. Les frais de maintenance apparaissent également comme un poste de dépense supérieur à celui du carburant.

♡ **Coûts de revient comparés des Peugeot iOn électriques et Peugeot 107 Trendy 5 portes essence (en euro/km)**



Source : [CAS](#)

LA VOITURE DE DEMAIN : CARBURANTS ET ÉLECTRICITÉ

Le calcul est relativement simple à effectuer dans la mesure où le constructeur propose la iOn avec un contrat annuel de location de 500 euros par mois d'une durée de cinq ans. Le calcul porte donc sur cette durée, la valeur de revente du VTh au bout des cinq années étant prise en compte.

Notons que la prime gouvernementale de 5 000 euros est captée à l'achat par Peugeot et que sa déduction est implicitement prise en compte dans ce calcul. Le prix de la Peugeot iOn peut apparaître comme excessivement cher, et ceci est dû en partie au fait qu'il s'agit d'un véhicule importé. Cependant, compte tenu de l'écart important de coût au km, même avec un prix inférieur, le calcul ne s'en trouverait pas fondamentalement modifié.

Coûts de revient kilométrique des Peugeot iOn et 107

Véhicule électrique iOn		VTh essence : 107 Trendy 5 portes	
Véhicule		Véhicule	
Durée d'utilisation	5 ans	Durée d'utilisation	5 ans
Bonus non compris		Coût du véhicule (toutes options)	11 000 €
Véhicule en location tout compris		Valeur de revente (20 % perte/an)	3 604 €
Loyer annuel	6 000 €	Annuité investissement	1 972 €
Électricité		Consommation carburant fossile	
Nombre de km/an électrique	10 000	Nombre de km/an thermique	10 000
Prix de l'électricité	120 €/MWh	Prix du carburant	1,35 €/l
Conso. électricité-traction/100 km	15 kWh	Conso. carburant/100 km	4,6 l
Consommation du chauffage	1,0 kW	Coût de carburant fossile par an	621 €
Vitesse moyenne	10 km/h		
Consommation totale/100 km autonomie théorique	25 kWh 64 km		
Pertes à la charge des batteries	10 %		
Consommation à la prise électrique	27,5 kWh		
Coût de l'électricité par an	330 €		
Autres charges		Autres charges	
Pas de charges	0 €	Maintenance par an	800 €
Compris dans la location	0 €	Taxes fixes et divers - par an	400 €
Bilan		Bilan	
Dépenses annuelles totales	6 330 €	Dépenses annuelles totales	3 793 €
Coût au km	0,633 €	Coût au km	0,379 €
dont véhicule	0,600 €	dont véhicule	0,197 €
dont électricité	0,033 €	dont carburant	0,062 €

Source : CAS



Quel est le prix des batteries de la Peugeot iOn ?

Si on prend pour prix de la iOn sans les batteries un prix identique à celui de la 107, le loyer annuel des batteries correspond alors à 6 000 euros – 1 972 euros, soit 4 028 euros. La valeur actuelle de ce loyer sur cinq ans est de 17 000 euros environ, équivalent au prix de la batterie. Celle-ci ayant une capacité de 16 kWh, le prix pour le client final est donc un peu supérieur à 1 000 euros/kWh de capacité embarquée, hypothèse que nous avions retenue comme étant celle de 2010.

7 ■ Économie des véhicules hybrides et hybrides rechargeables

Constructeur pionnier en matière de véhicules hybrides (VH), Toyota dispose d'une importante expérience. Ce sont deux de ses modèles qui ont servi à bâtir les comparaisons qui suivent. Le premier est la Toyota Prius, le VH actuellement le plus répandu, aux spécifications bien établies, mais qui n'a malheureusement pas d'équivalent thermique permettant une comparaison facile. Le deuxième qui n'a pas cet inconvénient est le modèle Auris, qui existe à la fois en modèle à essence classique et en version hybride, mais depuis peu, et les données fournies par Toyota sont encore non contractuelles (toutes les données retenues sont extraites du site officiel de Toyota en France). Aucun véhicule hybride rechargeable (VHR) n'étant à ce jour commercialisé, à défaut de chiffres officiels, nous regrouperons ici quelques réflexions économiques sur ce type de véhicules sur la base d'éléments connus.

Comparaison économique des Toyota Auris essence et hybride

Sur le site officiel du constructeur, les spécifications du modèle thermique sont bien précisées mais un flou subsiste pour le modèle hybride qui ne semble pas encore commercialisé : les données communiquées sont présentées comme n'engageant pas contractuellement Toyota. Le modèle thermique retenu est le modèle de base « 100 VVT-i » à 5 portes, sans équipements particuliers, mais avec « *stop & start* » de série et boîte manuelle à 6 vitesses.

♡ Caractéristiques techniques des Toyota Auris essence et hybride

	Essence	Hybride
Longueur	4,25 m	4,25 m
Poids total à vide	1 250 kg	1 250 kg
Moteur	1 329 cm ³	
Puissance	99 ch DIN	136 ch DIN
0-100 km/h	13,1 s	11,4 s
Vitesse maximum	175 km/h	180 km/h

Source : constructeur

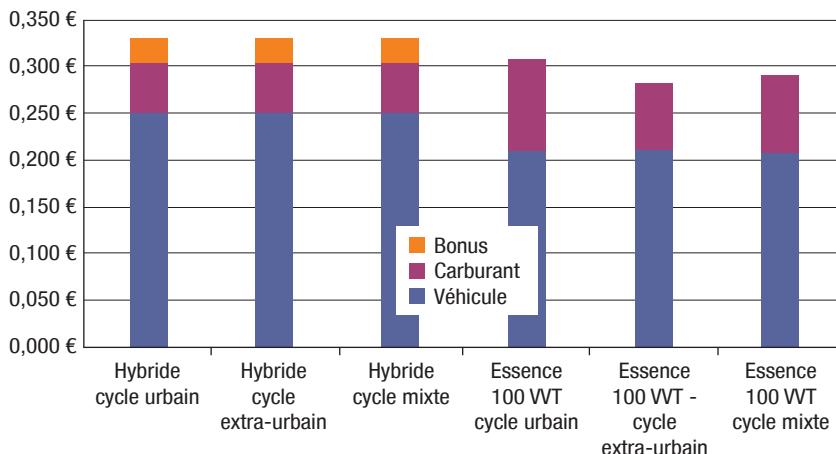
Le véhicule hybride présente un surcoût à l'achat de 5 800 euros (23 900 euros pour l'Auris hybride contre 18 100 euros pour la version essence 100 VVT) du fait de sa double motorisation et d'une capacité de batteries plus grande. Afin de compenser économiquement cet écart par une consommation moindre, le nombre annuel de kilomètres parcourus est déterminant et deux hypothèses à 20 000 et 10 000 km/an ont été retenues, avec des durées de possession respectives de 8 et 12 ans. Les consommations selon le type d'utilisation sont indiquées dans le tableau ci-dessous, et les histogrammes qui suivent illustrent la décomposition du coût de revient kilométrique selon les composantes.

♡ Consommation des Toyota Auris essence et hybride

	Essence		Hybride	
	Cycle urbain	Extra-urbain	Cycle urbain	Extra-urbain
Nombre de km/an	20 000 km	20 000 km	20 000 km	20 000 km
Conso. carburant/100 km	7,1 l	5,1 l	3,8 l	3,7 l
Coût de carburant fossile par an	1 988 €	1 428 €	1 064 €	1 036 €
Dépenses annuelles totales	4 596 €	4 036 €	4 186 €	4 158 €

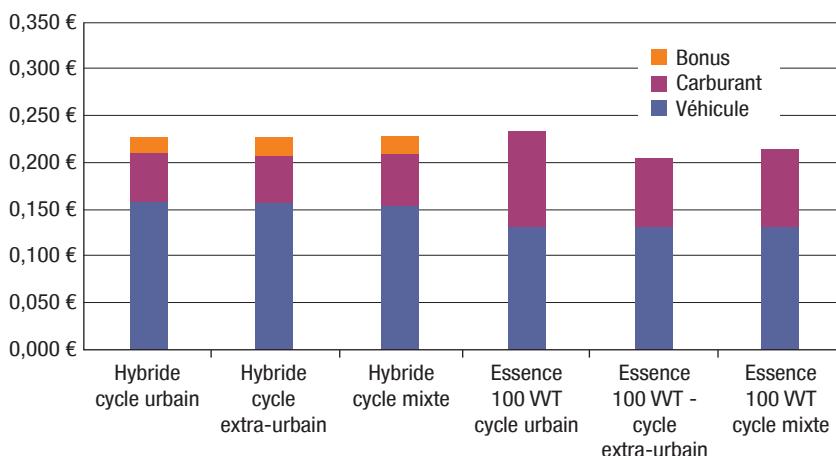
Source : CAS

♡ **Coût de revient kilométrique des Toyota Auris essence et hybride - 12 ans - 10 000 km/an**



Source : CAS

♡ **Coût de revient kilométrique des Toyota Auris essence et hybride - 8 ans - 20 000 km/an**



Source : CAS

Le résultat est conforme à ce qui était attendu, un véhicule hybride étant économiquement plus intéressant que son équivalent classique pour des parcours de type urbain, à partir d'un kilométrage annuel suffisamment important. Ces graphiques ne présentent qu'un intérêt illustratif, les deux modèles comparés n'étant pas exactement identiques. Le type et les conditions d'utilisation, le mode de conduite sont également des paramètres pouvant faire varier significativement ces résultats.

Comparaison économique des Toyota Prius et Verso essence

Dans la gamme de Toyota, la Verso est le modèle qui présente les caractéristiques techniques et les performances les plus proches de la Prius, les deux véhicules étant cependant assez différents : la Verso a par exemple un Cx (coefficent de traînée) moins bon que celui de la Prius, les équipements ne sont pas tout à fait comparables, même dans le modèle de base, sans options, retenu comme hypothèse de calcul (le but étant de comparer les motorisations). La mise en parallèle des deux modèles a pour but de dégager des tendances, à titre illustratif.

La consommation de la Prius hybride est inférieure à celle du modèle classique, de 2 à 4 l/100 km environ suivant le cycle d'utilisation. L'écart est le plus grand en cycle urbain, l'efficacité de l'hybridation étant alors maximale, mais il se réduit fortement pour les parcours routiers, le véhicule hybride ne fonctionnant alors plus que grâce à son moteur thermique.



Caractéristiques techniques des Toyota Prius VH et Verso essence

	Prius VH	Verso
Longueur	4,46 m	4,40 m
Poids total à vide	environ 1 400 kg	1 420 kg
Moteur	1 798 cm ³	1 598 cm ³
Puissance	136 ch DIN	132 ch DIN
0-100 km/h	10,4 s	11,7 s
Vitesse maximum	180 km/h	185 km/h

Source : constructeur

Comme pour les VE, aucun VHR n'est encore commercialisé, mais Toyota expérimente déjà des prototypes de Prius rechargeables. À défaut de plus amples

informations, il est considéré que le VHR est le VH auquel on aura ajouté des batteries, rechargeables sur le réseau électrique, et permettant d'effectuer des parcours de type urbain en mode purement électrique (le VH de Toyota étant équipé jusqu'à présent de batteries NiMH fiables et bien connues, les batteries Li-ion, plus performantes mais plus sensibles, étant réservées aux modèles rechargeables). Cette Prius VHR est prise comme cas d'école et son prix est égal à celui du VH identique, auquel doivent être ajoutés les 5 000 euros de batteries additionnelles dont la capacité est de 5,1 kWh.

⌚ **Coût de revient kilométrique des Prius VH, Prius VHR et Verso**

	Prius VH		Prius VHR		Verso	
	Véhicule	Véhicule	Batterie	Véhicule	Véhicule	Véhicule
Durée d'utilisation	8 ans		8 ans	8 ans	8 ans	
Prix du véhicule	26 500 €		26 500 €	5 000 €	21 400 €	
Bonus	2 000 €		5 000 €	5,1 kWh		
Valeur de revente (20 % perte/an)	4 446 €		4 446 €	0 €	3 590 €	
Annuité investissement	3 818 €		3 818 €	805 €		3 083 €
Utilisation/% effectué en électrique	Cycle urbain	Extra-urbain	80 %	20 %	Cycle urbain	Extra-urbain
Km annuel	15 000	15 000	15 000	15 000	15 000	15 000
Prix du carburant/élec.	1,40 €/l	1,40 €/l	0,12 €/kWh	0,12 €/kWh	1,40 €/l	1,40 €/l
Consommation/100 km	3,9 l	3,7 l	20 €/kWh	20 €/kWh	8,6 l	5,8 l
Coût de carburant/an	819 €	777 €	452 €	727 €	1 806 €	1 218 €
Dépenses totales/an	4 315 €	4 273 €	4 270 €	4 545 €	4 889 €	4 301 €
Coût au km utilisateur	0,288 €	0,285 €	0,285 €	0,303 €	0,326 €	0,287 €
Coût au km sans bonus	0,309 €	0,306 €	0,338 €	0,357 €	0,326 €	0,287 €

Source : CAS

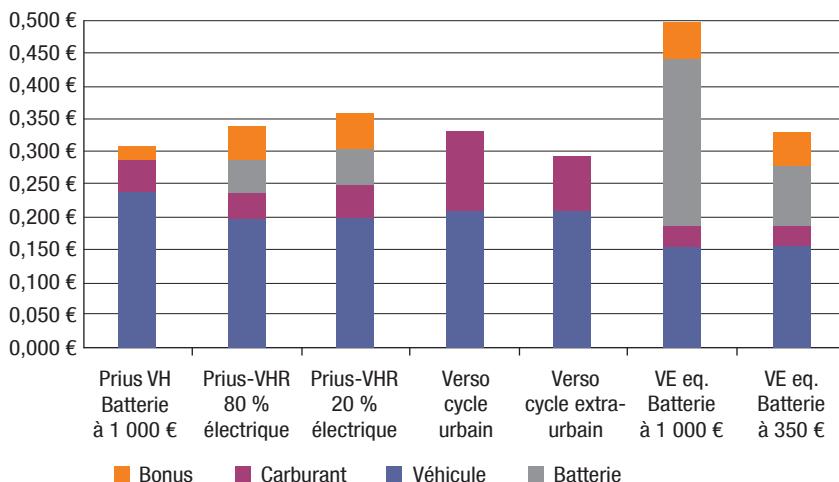
Un VHR Toyota Prius, dont la capacité des batteries est de 5,2 kWh, a permis de parcourir, en mode électrique, des distances de 18 à 20 km en cycle urbain ou sur route, en utilisant très peu les accessoires. Sur ces 5,2 kWh, selon le constructeur, moins de 3,2 kWh seraient réellement utilisés, ce qui correspond à une

consommation sur le cycle européen de conduite entre 13 et 15 kWh/100 km. L'hypothèse de consommation en mode électrique est de 20 kWh/100 km, conformément à celle retenue dans les autres calculs. Deux hypothèses d'utilisation du mode électrique sont retenues : 80 % et 20 % des distances parcourues, ce qui permet d'établir une fourchette de comparaison.

La maintenance est supposée égale pour tous les véhicules, cela avantageant les véhicules hybrides, *a priori* de conception, et donc d'entretien, plus complexe.

Les modèles hybrides bénéficient aujourd'hui d'un bonus gouvernemental de 2 000 euros qui est intégré dans le calcul et apparaît explicitement. Nous supposons que la subvention pour le VHR est celle attribuée au VE, soit 5 000 euros. Le tableau précédent détaille le calcul effectué avec ces hypothèses. L'histogramme ci-dessous illustre la décomposition des coûts. La barre entière (avec ses quatre composantes, véhicule, carburant, batterie, bonus) correspond au coût de revient kilométrique total, hors bonus. Le coût pour l'utilisateur s'obtient en soustrayant la part du bonus.

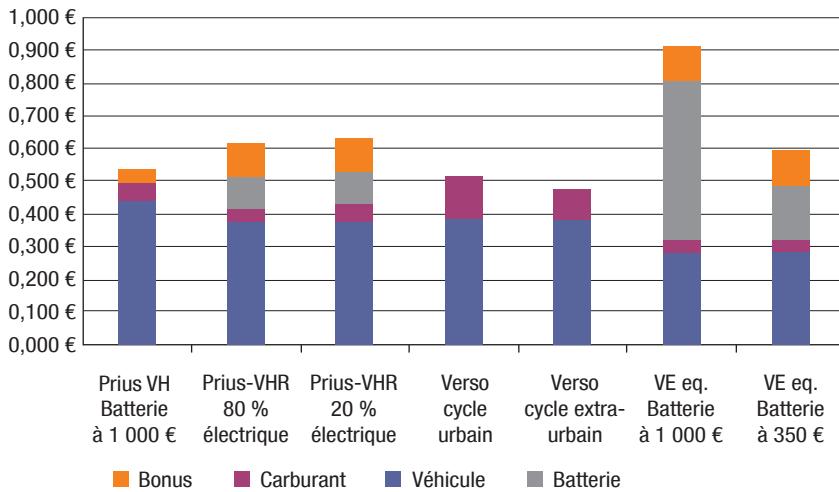
Coût kilométrique complet des Toyota Prius VH, VHR, Verso essence et VE équivalent – 8 ans – 15 000 km/an



Source : CAS



Coût kilométrique complet des Toyota Prius VH, VHR, Verso essence et VE équivalent – 8 ans – 8 000 km/an



Source : CAS

En mode extra-urbain, le VTh s'impose comme le plus économique, sauf si les bonus sont appliqués. En cycle urbain, les VH et VHR s'avèrent plus économiques, y compris sans bonus pour le VH. En tout état de cause, les écarts ne sont que de quelques centaines d'euros par an, somme à mettre en regard du coût des externalités induites par l'utilisation de moteurs thermiques dans les zones urbaines. Le VHR restant un véhicule polyvalent, capable de parcourir de longues distances sur route, sa commercialisation ouvre la voie à une possible législation bannissant l'utilisation de moteurs thermiques en ville, avec des coûts faibles ou nuls à supporter par les utilisateurs s'ils optent pour un VHR comme unique véhicule.

8 ■ Les émissions de CO₂ du véhicule électrique résultent du contenu en carbone de l'électricité qu'il consomme et des batteries qu'il utilise

Un VE est souvent présenté comme un véhicule « zéro émission » mais ce n'est vrai que localement, à l'endroit où il roule. Cela suppose que le chauffage ou la climatisation de l'habitacle n'est pas assurée par la combustion d'énergie fossile embarquée. Sa fabrication, en particulier celle des batteries,

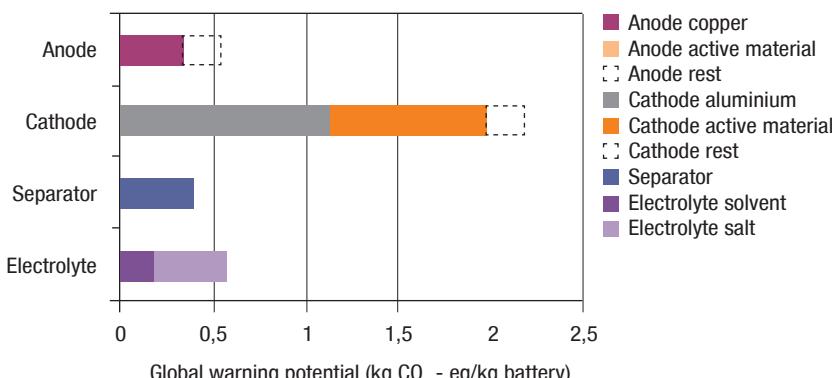
est fortement intensive en énergie et donc émettrice de CO₂. Son utilisation dépend de kWh électriques dont la production peut générer du CO₂ dans des proportions importantes. Le VE ne serait naturellement plus « zéro émission » s'il était chauffé avec un combustible fossile.

Émissions générées par la fabrication des batteries

Pour les émissions liées à la fabrication, seules sont prises en compte celles qui sont spécifiques aux VE, à savoir les émissions générées par la fabrication des batteries. On considère que la fabrication de la caisse, des moteurs et des organes de transmission est *a priori* aussi émettrice de gaz à effet de serre que celle d'un VTh.

Ces émissions peuvent se décomposer de la manière suivante.

♡ Émissions en kg-eqCO₂ engendrées par la fabrication d'une batterie Li-ion



Source : EMPA¹ (Suisse)

En incluant le conditionnement, l'électronique, les transports, on obtient le chiffre de 5,6 kg CO₂/kg de batterie, soit 56 kg CO₂/kWh de capacité de batterie, sans préciser l'origine ni les émissions spécifiques en CO₂ de l'énergie utilisée. Une étude² de l'American Chemical Society affiche une valeur de 1 200 MJ liée

[1] Gauch M., Widmer R., Notter D., Stamp A., Althaus H. J. et Wäger P. (2009), *Life Cycle Assessment LCA of Li-ion batteries for electric vehicles*, Empa - Swiss Federal Laboratories for Materials Testing and Research.
 [2] Samaras C. et Meisterling K. (2008), « Life cycle assessment of greenhouse gas emissions from plug-in hybrid vehicles: Implications for policy », *Environmental Science & Technology*, 42(9), p. 3170–3176.

à la fabrication de la batterie, à laquelle il faut ajouter 500 MJ pris en moyenne pour la production de matière première, ce qui au total correspond à 1 700 MJ/kWh, soit 472 kWh/kWh de batterie fabriqué. L'expert¹ auditionné par le CAS a évoqué le chiffre de 250 kWh/kWh, que nous retiendrons dans nos évaluations. Si l'on croise ces deux chiffres, cela correspond à un mix de production dont le contenu moyen est de 225 g CO₂/kWh, qui pourrait correspondre à celui de la Suisse. Mais avec un mix énergétique à base de charbon comme celui de la Chine, les émissions seraient plutôt proches de 200 kg CO₂/kWh de capacité de batterie. Le tableau suivant fournit à titre illustratif les émissions indirectes de CO₂ du VE par km parcouru².



Émissions indirectes du VE, en fonction du kilométrage annuel moyen, du mix énergétique utilisé à la fabrication ; batteries de 20 kWh et de durée de vie économique de 8 ans

	Émissions du mix énergétique en g CO ₂ /kWh			
	80	300	600	1 000
5 000 km annuel	10 g CO ₂ /km	38 g CO ₂ /km	75 g CO ₂ /km	125 g CO ₂ /km
10 000 km annuel	5 g CO ₂ /km	19 g CO ₂ /km	38 g CO ₂ /km	63 g CO ₂ /km
15 000 km annuel	3 g CO ₂ /km	13 g CO ₂ /km	25 g CO ₂ /km	42 g CO ₂ /km

Source : CAS

Ces émissions sont éminemment variables selon que les batteries sont produites avec des moyens décarbonés et que le VE roule beaucoup, ou que les batteries proviennent d'un pays où la production électrique se fait à base de charbon et que le VE roule peu.

Émissions liées à l'utilisation du véhicule

Les émissions liées à l'utilisation du véhicule nécessitent de connaître le type de moyen de production sollicité pendant les recharges de la batterie. La question des émissions de CO₂ générées par la production d'un kWh électrique a été l'occasion de nombreux débats et ne peut être résolue de manière précise et indiscutable, les électrons « décarbonés » ne pouvant être tracés sur leur parcours depuis la centrale jusqu'aux batteries des véhicules...

[1] Jean-Marie Tarascon.

[2] En théorie, le calcul doit être actualisé car les émissions ont lieu en début de vie du VE. Cependant, certains experts appliquent la règle dite de Hotelling au CO₂, qui devrait voir son coût croître dans le temps comme le taux d'actualisation. Pour cette raison et par facilité, un simple calcul quantitatif est effectué.

En France, le débat sur le contenu en CO₂ d'un usage a été abordé selon divers points de vue, ayant chacun ses avantages et ses inconvénients :

- le *contenu moyen* est obtenu en divisant le total des émissions par la quantité totale produite. En France, ce contenu est assez bas (environ 80 g CO₂/kWh) compte tenu de la faible proportion de moyens de production brûlant des combustibles fossiles dans le parc. Il a le mérite de la simplicité, mais comme le coût moyen qui ne peut constituer un signal économique pertinent, il n'a pas d'utilisation concrète possible, sinon comptable ;
- le *contenu incrémental*, utilisé pour évaluer le contenu énergétique des usages dans le diagnostic de performance énergétique des bâtiments, répartit, selon l'usage, la consommation qui correspond, en moyenne, à de la production de base et, en moyenne, à de la production de pointe. Il faut que l'additivité comptable du CO₂ soit respectée (les usages de base ayant un contenu inférieur à la moyenne et ceux de pointe supérieur). L'inconvénient est que cette méthode est difficile à mettre en œuvre et sujette à nombreuses discussions. L'avantage est qu'elle crée une différenciation entre les usages et se prête bien à la certification (elle est par exemple utilisée dans le diagnostic de performance énergétique pour les bâtiments et pourrait l'être pour le VE) ;
- avec le *contenu prospectif*, on coordonne le développement d'un usage avec celui du parc de production. Dans ce cas, c'est le contenu du nouveau moyen de production qui sera mis en place pour répondre à la demande engendrée par le nouvel usage qui devra être pris en compte, aux effets de bord près sur les courbes de charge. Pour un usage important, ce peut être un mix de moyens : une partie répondra au surcroît de demande de base occasionnée, du nucléaire par exemple, une partie à de la semi-base, charbon ou gaz, et une partie à la pointe ;
- le *contenu marginal* s'obtient en retenant les émissions associées au dernier kWh produit. En France, RTE¹ l'a récemment estimé entre 500 ou 600 g CO₂/kWh selon les usages. En effet, ce sont les moyens à base de charbon et de gaz qui sont majoritairement utilisés pour assurer la production des derniers kWh consommés, et ceci presque tout au long de l'année. En théorie, c'est un bon signal, mais ce contenu ne peut pas être utilisé en comptabilité carbone (on dépasserait de loin le bilan CO₂ total du système électrique). La grande difficulté tient dans son évaluation pour un usage

[1] Dans le cadre de la commission Énergie du CAS de 2007.

particulier, car il faut croiser la courbe de consommation correspondante avec celle des émissions instantanées, les deux variant dans le temps de manière aléatoire.

Si l'un de ces deux derniers contenus devait être pris en compte, en ce qui concerne le véhicule électrique, il n'existe aucun retour d'expérience sur les moments de la journée pendant lesquels les utilisateurs rechargent leur véhicule. L'idéal serait bien sûr qu'ils le fassent pendant les heures creuses, au moment où les coûts et les émissions marginales sont les plus faibles, ou mieux encore, au déclenchement d'un signal, ce que devraient permettre les futurs « *smart grids* ». Mais on peut aussi imaginer que l'angoisse de la panne sèche et le besoin de disposer de son véhicule à n'importe quel moment du jour ou de la nuit feront que les utilisateurs rechargeront le véhicule dès qu'ils en auront l'occasion. Ce sera souvent le soir, lorsque les automobilistes rentrent chez eux, ou bien le matin, lorsqu'ils arrivent sur leur lieu de travail (où il est prévu d'installer des bornes de recharge), c'est-à-dire dans ces périodes qui correspondent justement aux pics de consommation journaliers. Interrogé sur ce point, RTE a renouvelé son inquiétude de voir la demande de pointe augmenter de manière trop importante¹. Bien qu'il soit le plus à même d'analyser l'impact des usages sur la courbe de charge, RTE n'a pas encore de réponse organisée à la question spécifique du véhicule électrique.



Le VE et les réseaux intelligents (« *smart grids* »)

Les deux concepts sont très souvent liés et il est rare qu'on parle de l'un sans évoquer l'autre. Le VE est considéré comme profitant des *smart grids*, car ils lui permettent de se recharger aux meilleurs moments de la journée, bénéficiant des meilleurs prix et/ou d'une électricité décarbonée. À l'inverse, grâce à tous les VE raccordés au réseau, le système électrique se voit doté d'une impressionnante capacité de stockage répartie (« *V2G* », *Vehicle to Grid*). En inversant la charge d'une dizaine de millions de VE connectés à des moments de tension du système électrique, le réseau pourrait disposer, selon certains experts, d'une puissance équivalente à celle du parc nucléaire.

On est encore loin de la faisabilité opérationnelle de tels dispositifs mais, même en admettant qu'ils existent, il est difficile d'imaginer que la rentabilité du VE puisse s'en trouver significativement améliorée. En effet, l'utilisateur « moyen » risque fort de mettre son véhicule en charge lorsqu'il rentre à son domicile ou lorsqu'il arrive au travail le matin, c'est-à-dire au moment des

[1] RTE, Bilan prévisionnel 2009 et actualisation 2010.

pointes de consommation. Sa batterie risque d'être à un niveau de charge faible, et en mettant son véhicule à la disposition du réseau, il se prive de son usage pour plusieurs heures. En échange, son bénéfice financier pourra difficilement dépasser quelques dizaines de centimes d'euro, correspondant au produit du différentiel de prix entre heures de pointe et heures creuses par le nombre, nécessairement faible, de kWh que contient la batterie, sans tenir compte des pertes de charge/décharge et de l'usure de la batterie.

La pointe de consommation hivernale étant largement due, en France, au développement important du chauffage électrique, des solutions de délestage sélectif des appareils chauffants électriques lors des périodes d'extrême pointe semblent être plus appropriées et plus économiques pour écrêter ces pointes. En effet, arrêter le chauffage pendant une demi-heure entraîne une faible, donc très supportable, variation de température en raison de l'inertie thermique des logements, et, dans l'habitat, la puissance effaçable peut dépasser facilement 10 GW en hiver.

Le choix d'une méthode sortant largement du cadre de cette étude, ce n'est qu'à titre illustratif qu'a été reproduit dans le tableau ci-dessous l'impact du contenu en CO₂ du kWh électrique sur les émissions directes de CO₂ du VE par km parcouru. Là aussi, les émissions sont extrêmement variables selon le mix de production électrique du pays dans lequel le VE est utilisé.

⌚ **Émissions directes du VE en fonction de sa consommation et des émissions du mix énergétique utilisé pour les recharges**

Émissions du mix énergétique en g CO ₂ /kWh				
	80	300	600	1 000
15 kWh/100 km	12 g CO ₂ /km	45 g CO ₂ /km	90 g CO ₂ /km	150 g CO ₂ /km
20 kWh/100 km	16 g CO ₂ /km	60 g CO ₂ /km	120 g CO ₂ /km	200 g CO ₂ /km
25 kWh/100 km	20 g CO ₂ /km	75 g CO ₂ /km	150 g CO ₂ /km	250 g CO ₂ /km

Source : CAS

Dans le monde, et même marginalement dans des pays où la production de base est décarbonée, l'électricité est produite pour les trois quarts à base de combustible fossile, et le contenu des émissions de CO₂ du kWh électrique est très souvent compris entre 400 et 800 g. Dans ce cas, l'utilisation du VE à fin de

réduction des émissions de gaz à effet de serre est pour le moins contestable, surtout si l'on inclut les émissions indirectes dues à la fabrication des batteries. Cette fabrication est en effet concentrée dans les pays de l'Est asiatique (Chine, Japon, Corée) dont les mix de production électrique sont assez émetteurs de gaz à effet de serre.

Le tableau suivant tente de reconstituer un bilan intégrant le CO₂ contenu dans les batteries et le CO₂ émis par la production des kWh selon les différents pays.

⌚ **Émissions totales de CO₂ des VE (directes et indirectes)**

Pays où la voiture est utilisée	Pays de fabrication de la batterie		
	Corée, Japon	Chine	
	g CO ₂ /kWh	420	800
Norvège, Suisse, Suède	20	30 g CO ₂ /km	54 g CO ₂ /km
France, Brésil	80	42 g CO ₂ /km	66 g CO ₂ /km
Danemark, Allemagne, Japon, Corée	420	110 g CO ₂ /km	134 g CO ₂ /km
Israël, Chine	800	186 g CO ₂ /km	210 g CO ₂ /km
Inde, Australie	1 000	226 g CO ₂ /km	250 g CO ₂ /km

Hypothèses

kWh/kWh de batterie fabriqué	250
Années de durée de vie des batteries	8
kWh capacité de la batterie	20
kWh/100 km consommation du VE	20
km/an	10 000

Source : CAS

9 ■ L'exemple du projet Autolib'

Les conditions de rentabilité étant incertaines dans le schéma traditionnel où l'utilisateur posséderait son propre véhicule électrique, les solutions d'auto-partage (« *car pooling* » ou « *car sharing* ») sont souvent évoquées afin de les améliorer. En effet, un taux d'utilisation plus élevé devrait permettre de mieux

rentabiliser l'investissement important que constitue l'achat d'un VE et une utilisation urbaine semble bien adaptée à des solutions de partage de véhicules. Le projet Autolib' est un des premiers projets d'envergure de ce type et des chiffres assez précis ont été communiqués par ses promoteurs, permettant une analyse économique.

Le principe retenu est identique à celui du Vélib'. Il s'agit d'un projet de réseau de 1 000 stations (700 pour Paris) et de 3 000 véhicules électriques en libre-service qui doit être opérationnel à l'automne 2011. La ville de Paris et une quinzaine de communes de la petite couronne se sont regroupées dans un syndicat mixte qui, après appel d'offres, doit choisir un exploitant qui sera chargé de l'achat des véhicules, de leur entretien et de la gestion de la clientèle et du système. Le syndicat mixte prend à sa charge le financement des stations, le reste étant assuré par l'exploitant qui doit se rémunérer avec les recettes procurées par les abonnements et la location des véhicules. Les évaluations économiques ci-dessous intègrent des données publiques, et une répartition des dépenses et des recettes telles qu'elles ont été communiquées par le syndicat mixte Autolib'.

Un investissement global de près de 200 millions d'euros

Les stations n'auront que 4 ou 6 places, au maximum 10 en souterrain, où les véhicules seront rechargés en charge lente (3 kVA), exceptionnellement en charge rapide près des gares. Leur financement est assuré par le syndicat mixte avec un plafond de 50 000 euros par station, soit 50 millions au total. Le coût prévisionnel des stations étant de 60 000 euros, le dépassement sera à supporter par l'exploitant.

Le véhicule retenu devra avoir quatre places pour des raisons de « compatibilité familiale ». Les voitures seront chauffées mais non climatisées. Trois types de véhicules étaient pressentis au lancement du projet : la Smart, la Peugeot iOn et la BlueCar de Bolloré, cette dernière ayant finalement été retenue par le syndicat mixte en décembre 2010, pour une mise en service fin 2011.

Le prix des voitures serait compris entre 27 500 et 30 000 euros après déduction des subventions (super bonus gouvernemental de 5 000 euros) mais sans prise en compte des équipements supplémentaires propres à Autolib', estimés à 5 000 euros. Les véhicules seront sous contrat de location de cinq ans, avec des garanties sur les batteries dépassant cinq ans. L'investissement pour l'exploitant devrait donc être proche de 105 millions

d'euros (pour mémoire, l'État finance l'opération à hauteur de 15 millions d'euros au travers des aides qu'il accorde aux véhicules électriques). Le tableau suivant résume les sommes investies par chacune des parties prenantes.

 **Dépenses d'investissement prévisionnelles du projet Autolib'**

	Dépenses à la charge		
	du syndicat Autolib'	de l'exploitant	de l'État
Véhicules			
Nombre de véhicules		3 000	3 000
Dépense par véhicule (k€)		35	5
Coût total véhicules (M€)		105	15
Stations de recharge			
Nombre de stations	1 000	1 000	
Coût unitaire station (k€)	50	10	
Coût total stations (M€)	50	10	
<i>Total en millions d'euros</i>	50	115	15

Source : CAS

Des dépenses de fonctionnement annuelles de 80 millions d'euros diversément compensées selon les scénarios d'utilisation

L'abonnement mensuel envisagé est de 15 euros, le prix moyen de location de 5 euros par demi-heure. Les coûts de fonctionnement annuels prévisionnels annoncés sont de 80 millions. Avec ces hypothèses, la rentabilité économique pour l'exploitant, permettant de rembourser son investissement, n'est atteinte que si l'opération enregistre 200 000 abonnements et si les véhicules sont en utilisation payante au moins 7 heures par jour toute l'année, ce qu'espère le syndicat mixte.

Un tel taux d'utilisation paraît très optimiste, surtout si l'on tient compte du temps nécessaire au recharge des batteries qui peut être plus important que le temps d'utilisation. En hiver, ce sera systématiquement le cas, puisque la puissance du chauffage de l'habitacle est équivalente à celle de la station de recharge (3 kW). À La Rochelle, où une location de VE est proposée aux habitants depuis plus de dix ans, mais à une échelle plus réduite (50 véhicules pour 10 stations), les taux d'utilisation constatés sont proches de 1 heure par jour, avec des parcours moyens de 5 km.

Concernant l'usage, il n'est pas certain qu'il faille compter sur une évolution des comportements chez les automobilistes. Pour le chauffage ils étaient habitués à disposer, avec les véhicules thermiques, d'une source de chaleur marginale gratuite et donc à ne pas la gérer. Il sera intéressant à ce titre de réaliser un retour d'expérience sur l'utilisation du chauffage dans les véhicules électriques d'auto-partage tel Autolib' et de mesurer l'impact sur l'autonomie et la consommation d'électricité réelles¹.

Le tableau suivant simule de manière simplifiée trois scénarios contrastés, montrant que la rentabilité de l'opération peut rapidement se dégrader si les hypothèses se révèlent moins favorables que prévu. Avec un nombre d'abonnés inférieur de moitié à la prévision, un taux d'utilisation tel que celui constaté à La Rochelle et des frais de fonctionnement supérieurs de 10 millions d'euros à ceux prévus (en raison d'importantes dégradations des véhicules, par exemple), le bilan annuel de fonctionnement pour l'exploitant pourrait être négatif de 60 millions par an (hors remboursement des investissements).



Dépenses prévisionnelles de fonctionnement du projet Autolib'

Bilan annuel de fonctionnement	Scénarios		
	du Syndicat Autolib'	Médian	Pessimiste
Coûts de fonctionnement (M€)	80	80	90
Recettes			
Abonnement mensuel (€)	15	15	15
Nombre d'abonnés	200 000	200 000	100 000
Recettes abonnement (M€)	36	36	18
Prix horaire (€)	10	10	10
Utilisation heures/jour/véhicule	7	4	1
soit nombre heures/abonné/mois	3,2	1,8	0,9
Recettes utilisation (M€)	76,7	43,8	11,0
Total recettes annuelles (M€)	112,7	79,8	29,0
Bilan annuel (M€)	32,7	- 0,2	61,1

Source : CAS

[1] La puissance que nécessite la climatisation va de 1 kW à 3 kW selon les conditions. La question du chauffage est encore plus problématique, surtout dans les pays très froids, la résistance chauffante pouvant, sur certains modèles, mobiliser jusqu'à 5 kW de puissance.

Le syndicat mixte mise sur le succès de l'opération. Il met en avant que les gains économiques et environnementaux principaux seront liés au service, et non à la voiture électrique elle-même, car le service aura une influence sur les comportements et favorisera les transports en commun et les « modes propres », qui ne sont pas quantifiables dans un raisonnement purement économique.

Réglementation, normes et standards pour le déploiement du véhicule électrique

Avertissement : ce chapitre est à jour à la date du 8 décembre 2010 des travaux relatifs à la réglementation et à la normalisation, qui se poursuivent activement. Les principaux éléments d'information qu'il contient ont été utilisés pour l'annexe relative au même objet du « Livre vert » pour les collectivités locales établi sous l'égide de la mission interministérielle sur le véhicule décarboné dans le cadre de la mission confiée par le gouvernement au sénateur Louis Nègre¹. La plupart des dispositions qu'il décrit et des recommandations qu'il contient s'appliquent également au véhicule hybride rechargeable.

1 ■ Un déploiement à grande échelle suppose une action volontariste en matière de réglementation et de normalisation

Le véhicule électrique ne peut être déployé sans réglementations assurant la maîtrise de sa sécurité et de son impact environnemental. Il nécessite également le développement et l'application de normes consensuelles permettant la mise en œuvre des dispositions réglementaires, ainsi que l'interopérabilité et la qualité de service à tous les niveaux (charge, localisation, facturation, maintenance, réparation).

La réglementation, les normes et les standards ont un rôle absolument crucial pour que le déploiement à grande échelle du véhicule électrique soit un succès, tant auprès des usagers qu'en matière de réduction effective des coûts et des impacts environnementaux (GES, pollution aérienne et sonore, fluidité du trafic, etc.). Ils doivent contribuer à :

- *créer, et imposer si nécessaire, un langage et des métriques communs : termes et définitions, identification, codification, méthodes de mesure et*

^[1] *Livre Vert sur les infrastructures de recharge ouvertes au public pour les véhicules « décarbonés », remis au Premier ministre par le sénateur Louis Nègre le 26 avril 2011.*

d'essais, d'autant que les technologies mises en œuvre sont à la convergence d'industries aux histoires différentes (mécanique, électrotechnique, informatique, télécoms), avec des filières de normalisation distinctes (ISO, CEI ou UIT au plan international), même si elles sont coordonnées ;

- *apprécier, encadrer et communiquer sur la sécurité, l'impact sur l'environnement et les performances* ;
- *assurer l'interopérabilité pour l'accès à l'infrastructure de charge*, tant du point de vue physique que de l'optimisation énergétique et de la communication ;
- *réduire les coûts de l'industrialisation* en créant d'emblée un marché de taille internationale et favoriser des solutions initiales d'un coût acceptable par le marché et la société, susceptibles d'évoluer pour épouser les progrès et les innovations ;
- *sécuriser l'utilisation*, gage de confiance et de fidélisation de l'usager ;
- *soutenir les modèles d'affaire innovants* qui vont être mis en œuvre ;
- *fournir les outils et les moyens de mesure et/ou de contrôle* pour une politique d'incitation et d'encadrement par les pouvoirs publics (soutien aux infrastructures, régime préférentiel pour le véhicule électrique, taxation différenciée de l'électricité consommée, flexibilité du réseau de production, de transport et de distribution de l'électricité, achats publics...).

L'électricité est distribuée partout. C'est par un nombre élevé de points de charge, d'emploi sûr et facile, que le véhicule électrique compensera une autonomie intrinsèque encore réduite. La recharge du véhicule électrique doit être un acte banal et bon marché. D'où l'importance des interfaces de communication, qu'il s'agisse d'identification, d'accessibilité, d'interopérabilité, de facturation ou de sécurité. Ces interfaces se situent entre le réseau électrique et la borne de recharge (aspect « *smart grid* » notamment), entre celle-ci et le véhicule (et sa batterie) et entre le réseau d'installations de charge et le véhicule (« *roaming* »). Les choix techniques en matière d'infrastructures et de normes doivent permettre cette communication et cette interopérabilité, en prenant en compte les divers modèles d'affaires susceptibles de cohabiter dans la zone de déploiement.

Le présent chapitre a donc pour objet de dresser un état des lieux et des perspectives à moyen terme pour l'ensemble des aspects réglementaires et normatifs du véhicule électrique. Après un rappel du champ couvert,

on passera en revue les réglementations applicables, les principaux développements en cours en matière de normalisation et de standards privés, au plan national, européen et international. On conclura par quelques recommandations.

2 ■ L'imbrication entre la réglementation, la normalisation et les standards

Le cadre réglementaire est établi par un processus qui implique une base législative et permet l'instauration d'obligations et de contrôles associés. La réglementation fait toutefois de plus en plus référence à des normes établies sur une base consensuelle s'appuyant sur un processus itératif et ouvert de concertation et de vérification du consensus entre les acteurs concernés. En outre, compte tenu du caractère évolutif et innovant du véhicule électrique lui-même et de ses modalités de déploiement, des standards sont proposés par des constructeurs individuels ou groupés entre eux ou avec d'autres acteurs du secteur sous forme de consortiums (par exemple, EVPlug Alliance, Quick drop™, ChaDeMo™, protocoles de communication tel « Homeplug alliance »), en général pour promouvoir et, le cas échéant, protéger des technologies et des modèles d'affaires particuliers. Ces standards peuvent d'ailleurs ouvrir la voie à la normalisation proprement dite, comme on l'a vu dans le passé pour d'autres technologies (par exemple, VHS et Betamax, Blu-Ray et HD DVD).

Les réglementations applicables concernent d'une part les installations de charge et leurs connexions avec les véhicules, d'autre part les véhicules eux-mêmes, leurs constituants et leur rapport à l'environnement, notamment en matière de communication ou de performances énergétiques ou environnementales. Le cadre réglementaire est déjà largement en place au plan général des installations de distribution électrique et des véhicules routiers à moteur, de leur sécurité et de leur impact sur l'environnement. Toutefois, les modalités d'application aux caractéristiques spécifiques du véhicule électrique et de leur recharge doivent être précisées et harmonisées au plan européen ou international, ce qui est aussi l'objet des normes spécifiques auxquelles elles peuvent se référer.

2.1. La référence aux normes dans les réglementations

♡ Le principe de la référence aux normes

La plupart des réglementations applicables au véhicule électrique et à l'infrastructure de charge associée fixent des exigences essentielles et, de plus en plus, renvoient à des normes basées sur le consensus pour les détails techniques d'application, selon le principe de la « nouvelle approche » adoptée depuis vingt ans pour l'harmonisation des réglementations au sein de l'Union européenne.

Les textes réglementaires fixent des exigences, essentiellement relatives aux aspects de sécurité ou d'impact environnemental. Conformément à la pratique développée en France et au plan européen depuis deux décennies pour l'harmonisation des exigences réglementaires, les réglementations applicables aux véhicules en général, et aux véhicules électriques en particulier, font de plus en plus une large référence à des normes élaborées sur la base du consensus au niveau national (AFNOR et bureaux de normalisation sectoriels, principalement, s'agissant du véhicule électrique : le BNA-Bureau de normalisation de l'automobile et l'UTE-Union technique de l'électricité), au niveau européen (CEN, CENELEC, ETSI) et au niveau international (ISO, CEI, UIT).

Les réglementations sont harmonisées au niveau européen lorsqu'elles ont un impact sur la libre circulation des produits au sein de l'Espace économique européen ou relèvent de politiques communes (énergie et environnement, par exemple). Dans ce cas, elles s'appuient sur des normes européennes harmonisées, dont la référence est publiée au *Journal officiel de l'Union européenne*. Chaque fois que cela est possible, les normes visées sont la reprise de normes internationales, tant en raison de la vocation exportatrice de l'Europe que de ses obligations au titre de l'Organisation mondiale du commerce (OMC) en matière d'entraves techniques au commerce. La conformité à de telles normes, selon des modalités précisées dans chaque directive, vaut présomption de conformité aux exigences édictées.

Le déploiement du véhicule électrique fait l'objet d'une stratégie européenne, réaffirmée notamment à l'occasion du Conseil européen de compétitivité en mai 2010, qui inclut la normalisation comme un volet important de politique commune. Un mandat de normalisation a été confié aux instituts européens de normalisation (CEN, CENELEC, ETSI). Un volet de recherche « prénormative » est prévu dans le programme « Green car » du 7^e programme-cadre de R & D européen.

La section suivante fait le point des réglementations en vigueur dont le déploiement du véhicule électrique doit tenir compte. Les directives européennes visées sont toutes transposées en droit français, éventuellement assorti de délais d'entrée en vigueur.

2.2. Un contexte réglementaire qui doit être adapté pour le véhicule électrique

Les véhicules électriques au sens large doivent satisfaire aux dispositions générales applicables aux véhicules routiers. De même, l'infrastructure de charge nécessaire à leur alimentation est soumise aux réglementations relatives à la distribution et à la sécurité électrique dans les bâtiments et sur la voie publique. Toutefois, ces dispositions doivent être adaptées en tant que de besoin à leurs spécificités, en ce qui concerne notamment :

- l'installation de charge ;
- le comptage de l'électricité fournie ;
- le véhicule électrique (au sens large) dans son ensemble et ses équipements et composants électriques, en particulier pour ce qui est de la sécurité active et passive pour tenir compte de la présence d'une batterie volumineuse et pesante et de la présence de produits chimiques spécifiques ;
- la fin de vie du véhicule et l'élimination des déchets électriques et électroniques.

La nécessité de préciser la réglementation pour les paliers et conditions de charge

⌚ Des puissances de recharge non réglementées

Les paliers de puissance de recharge ne font pas encore l'objet d'une réglementation, ni même d'une normalisation volontaire. Cela complique la planification en nombre et en puissance des installations de charge dans les lieux ouverts au public. Ceux qui vont être utilisés en France correspondent en gros aux puissances disponibles avec des disjoncteurs de 16, 32 et 63 A :

- *charge normale* : 3 kVA et courant alternatif maximum de 16 A monophasé ;
- *charge accélérée* : 22 kVA et courant alternatif maximum de 32 A triphasé= [choix de Renault notamment] ;
- *charge rapide* : 43 kVA en courant triphasé alternatif de 63 A maximum ou en courant continu [choix de PSA notamment].

Jusqu'à 22 kVA, on peut envisager une modulation entre 3 et 22 kVA, en particulier en cas de foisonnement sur un même point de livraison d'électricité.

La recharge des véhicules doit s'effectuer essentiellement lors du stationnement de longue durée (nocturne au domicile, en parking collectif ou sur la voirie, ou en creux de journée sur le lieu de travail) et à un niveau de puissance de charge usuel dans le contexte domestique (3 kVA, soit 5 à 8 heures pour une recharge complète en charge dite « normale »). Parce qu'il utilise pour l'essentiel une infrastructure existante sans la bouleverser, ce mode de charge dite « normale » est, de loin, le moins coûteux et donc le plus souhaitable. Sur la base de simulations, et des premières expérimentations, on escompte 90 % à 95 % de recharges de ce type. Pour sécuriser l'utilisation du véhicule et offrir plus de flexibilité dans la gestion de la demande en électricité, il est toutefois nécessaire de donner en sus la possibilité de recharges d'appoint en dehors du stationnement principal, « accélérées » (22 kVA, soit une recharge complète en 1 heure maximum), voire « rapides » (43 kVA, maximum 30 minutes). Cette possibilité doit être limitée pour des raisons de coût et d'impact sur la durée de vie des batteries, mais aussi pour réduire les émissions de GES en privilégiant la charge en heures creuses et éviter ainsi de déstabiliser le réseau par des appels de puissance massifs et imprévisibles. Il en résulte une diversité de bornes de charge possibles, d'autant que les constructeurs automobiles, en fonction des marchés visés, proposent des modèles différenciés combinant divers paramètres quant à la nature et aux modalités de charge : puissance, courant mono ou triphasé, courant alternatif ou continu et donc chargeur/redresseur embarqué ou non, câble de connexion nomade ou non.

L'installation de charge dans son ensemble, qu'elle soit chez le particulier ou accessible au public dans le domaine privé ou sur la voie publique, relève tout d'abord de la réglementation générale pour la réalisation, la rénovation ou l'extension des installations électriques en basse tension (c'est-à-dire inférieure à 1 000 volts) dans les bâtiments d'habitation. Elle rend obligatoires les normes NF C 14-100 (installations de branchement à basse tension) et NF C 15-100 (installations électriques basse tension) (arrêté du 22 octobre 1969 régulièrement mis à jour). Un décret du 22 mars 2010 régit l'attestation de conformité (CONSUEL) et l'habilitation électrique des intervenants. Un décret du 14 novembre 1988 (modifié en 1995) précise l'articulation avec le code du travail pour les installations qui en relèvent, ce qui est le cas des installations de charge du domaine accessible au public.

💡 **Socles de prise : obturateur ou volet de protection ?**

Un aspect particulier de la norme C 15-100, sur laquelle s'appuie la réglementation, concerne la présence d'un obturateur dans les socles de prises de courant jusqu'à 32 A compris. L'obturateur est destiné à empêcher l'introduction d'un objet dans une seule alvéole et donc à protéger essentiellement les enfants. Mais la norme laisse la possibilité de ne pas en mettre si l'axe des alvéoles « est placé à une hauteur minimale de 1,40 m du sol fini » ou bien de remplacer l'obturateur par un « volet de protection ». De plus, elle dispense les « prises industrielles » de ces obligations, ouvrant ainsi la porte à des interprétations, tant pour les installations à domicile que pour celles dans les lieux publics, ou encore pour les cordons de raccordement attachés à une borne fixe considérée comme « industrielle ». Il est indispensable de lever cette ambiguïté, qui est également source de divergence avec d'autres pays comme l'Allemagne. Cette situation conduit constructeurs et équipementiers à développer des modèles spécifiques pour la recharge des VE et à imposer un mode de charge qui assure que la prise n'est pas sous tension lorsque elle est branchée (pour les modes de charge, voir *infra*).

Il convient de souligner que ce premier ensemble de textes réglementaires est le seul qui soit purement national, même si des normes européennes et internationales sont visées pour son application. En particulier, la norme internationale CEI 60364 est visée pour l'application de la NF C 15-100, mais laisse la possibilité d'options et d'interprétations pour tenir compte des situations nationales, ou encore pour la NF EN 61140, qui est une norme fondamentale pour la protection contre les chocs électriques. Cela entraîne quelques différences entre pays, notamment pour les prises, la connectique associée et les régimes de charge (obturateurs ou non, courant triphasé ou monophasé, courant alternatif ou continu). Cela peut nécessiter des fiches d'interprétation, dont l'établissement est coordonné au niveau national par la commission U15 gérée par l'UTE.

💡 **Quel rapport avec la réglementation sur les installations classées et sur les établissements recevant du public ?**

S'agissant de la sécurité, l'installation de charge dans son ensemble relève de la réglementation des installations électriques dans les bâtiments. Pour les installations accessibles au public, il reste encore à préciser l'articulation avec les réglementations sur les installations classées pour la protection de

l'environnement (ICPE) et sur les établissements recevant du public (ERP). Quant aux installations privatives, limitées à 3 kVA et équipées de prises domestiques ordinaires conformes à la norme NF C 61 314, beaucoup reste à faire pour clarifier leurs conditions d'usage et pour harmoniser la communication sur les limitations, ajustements et contrôles auxquels elles doivent donner lieu.

Une interprétation au regard de la réglementation sur les installations classées ou de celle sur les espaces recevant du public est nécessaire pour les installations dans des lieux pouvant présenter des risques : en sous-sol ou dans une station-service (donc à proximité de dépôts de carburants ou de stations d'échange de batteries avec stockage et recharge en grand volume).

L'installation de charge dans son ensemble relève ensuite d'une réglementation spécifique en matière de compatibilité électromagnétique. Il s'agit de la directive européenne 2004/108/CE du 15 décembre 2004, dite « directive CEM », qui instaure un marquage CE et s'appuie sur des normes européennes harmonisées. L'ensemble constitué par le véhicule et l'installation est en effet susceptible d'émettre de tels rayonnements au moment de la charge, en particulier lors de la charge accélérée ou rapide. Il semble toutefois que le principal risque soit celui d'une transmission par conduction d'harmoniques pouvant perturber le réseau électrique, notamment en cas de charges accélérées ou rapides simultanées de plusieurs véhicules sur une station de charge groupée.

De plus, les composants et sous-ensembles de l'installation de charge peuvent relever, individuellement, de la directive européenne 2006/95/CE du 12 décembre 2006, dite « basse tension » soit entre 50 et 1 000 volts en courant alternatif et entre 75 et 1 500 volts pour le courant continu. Celle-ci s'appuie également sur des normes européennes harmonisées et couvre les modalités d'évaluation de la conformité (marquage CE).

Les modalités d'application de ces réglementations dépendent des niveaux et des caractéristiques de courant et de tension délivrés par l'installation de charge et laissent des latitudes et des marges d'interprétation en ce qui concerne les prises et connexions (voir *infra*). La norme NF EN 61851 définit les exigences pour les stations de charge, les socles et les prises de courant, ainsi que les modes de charge reconnus et recommandés pour le véhicule électrique, mais des options restent possibles. Le consensus en France est de :

- prescrire une prise dédiée de recharge tant au domicile que dans les lieux publics, avec un niveau de sécurité adéquat (mode de charge 3, voir *infra*, et socles de prise avec obturateur) ;

- tolérer dans une phase transitoire, pour une puissance et un courant limités en fonction des usages, l'utilisation d'une prise classique (3 broches dont une pour la terre) en mode de charge 1 ou 2 pour la seule charge normale, avec un dispositif de coupure différentiel adapté (DDR) permettant de limiter le courant appelé pour améliorer la sécurité de la charge et la durée de vie de la prise. *Ceci suppose toutefois une vérification de conformité de l'installation pour garantir la sécurité de l'usager, en particulier pour s'assurer de la qualité de la prise de terre.*

L'harmonisation européenne est rendue complexe par les différences structurelles entre les réseaux : les pays germanophones délivrent un courant (alternatif) triphasé aux particuliers (réseau TN « terre-neutre »), alors que c'est exceptionnel en France (réseau TT « terre-terre »). Il se trouve de plus que, dans les pays à réseau TN, la proportion de logements individuels avec place de stationnement privative est bien plus grande que dans les pays à réseau TT (50 %-70 % contre 20 %). Les charges accélérées et rapides sont plus efficaces avec une alimentation en courant triphasé, mais nécessitent, comme pour le courant monophasé, un chargeur embarqué sur le véhicule. Une autre option (CHAdeMO par exemple) privilégie la charge rapide avec du courant continu et un chargeur lié à l'installation de charge.

Enfin, les pouvoirs publics ont mis en chantier un projet de « décret relatif aux installations dédiées à la recharge électrique d'un véhicule électrique ou hybride rechargeable dans les bâtiments et aux infrastructures pour le stationnement sécurisé des vélos ». Ce décret vise essentiellement à faciliter l'insertion d'installations de charge dans des bâtiments neufs ou existants.

Des choix qui restent à faire pour le comptage de l'électricité fournie

Le comptage doit être considéré à deux niveaux :

- entre le gestionnaire du réseau public de distribution et l'exploitant de l'installation de charge, qui délivre l'électricité à l'usager ;
- entre l'exploitant de l'installation de charge et l'utilisateur du véhicule électrique.

Pour le premier niveau, on est dans la situation d'un accès au marché des fournisseurs d'électricité par le réseau public réglementé par la loi. Le comptage se fait à l'aide de compteurs couverts par la directive européenne 2004/22/CE sur les instruments de mesure, qui en régit les conditions d'homologation et s'appuie sur des normes européennes harmonisées (à noter toutefois que cette

directive ne couvre pas le comptage de la fourniture de courant continu). Le gestionnaire du réseau public de distribution installe les compteurs et traite les données.

Le deuxième niveau de comptage est un mesurage associé au point de charge pour les besoins de la gestion de l'installation, notamment pour répercuter les coûts aux usagers en tenant compte de leur utilisation du point de charge.

Comptage : des choix restent à faire

Pour le comptage, et donc la répercussion à l'usager du prix de l'électricité délivrée pour la recharge du véhicule, diverses solutions sont envisageables, selon notamment qu'il s'agit de recharge à domicile ou de recharge dans un lieu public. Le mode de taxation, la diversité effective des fournisseurs d'électricité et la distinction tarifaire qui pourrait être opérée entre alimentation à domicile et alimentation en dehors du domicile ont un impact direct sur les modalités de comptage. Si l'on retient l'inclusion du prix de l'électricité fournie dans un prix de prestation plus globale, incluant notamment l'amortissement de l'installation de charge, le temps de stationnement et/ou le temps de la charge elle-même, il reste à décider si l'on donne quand même à l'usager une information sur la quantité d'électricité fournie, ce qui impliquerait alors un comptage hors métrologie légale au sens strict. Des choix réglementaires clairs à cet égard restent donc à effectuer.

Trois types de solutions sont envisageables :

- réaliser le comptage à bord du véhicule ;
- réaliser un comptage fixe en amont du véhicule grâce à un branchement spécifique pour chaque prise de charge de véhicule. Cette solution implique d'avoir à domicile deux points de livraison dont un dédié au VE (et au VHR) et donc deux compteurs ;
- si l'on ne souhaite pas créer un point de liaison et de livraison spécifique pour le VE (et le VHR), ce qui serait un frein important à son développement, on peut envisager un dispositif de comptage en aval des compteurs de distribution capable de distinguer la livraison au véhicule des autres usages, en faisant appel aux technologies domotiques.

On peut aussi considérer qu'en dehors du domicile, on se trouvera dans le contexte d'une prestation de service entre le gestionnaire de l'infrastructure de charge et l'utilisateur, dont la fourniture d'électricité ne sera qu'un élément

accessoire, le principal étant la mise à disposition de l'infrastructure, incluant le parking. Le prix de cette prestation plus globale pourra être calculé selon divers paramètres de la constitution des coûts (durée, puissance, période temporelle) et selon diverses modalités (abonnement, inclusion dans le prix du parking, démarche commerciale). Il reste à décider toutefois si l'on donne à l'usager une information sur la quantité d'électricité fournie, ce qui implique un comptage indicatif, mais hors du champ de la métrologie légale.

Par ailleurs, deux autres directives européennes en cours de mise en application concernent la question du comptage :

- la directive 2006/32/CE du 5 avril 2006 sur l'efficacité énergétique, qui ouvre la voie aux compteurs intelligents (« *smart meters* »), dont l'application dans les logements neufs doit démarrer en France dès 2012 ;
- la directive 2009/72/CE du 13 juillet 2009, plus précise sur la mise en place de compteurs intelligents et traitant également des réseaux de distribution intelligents (« *smart grids* »). Elle fixe les exigences fonctionnelles quant à la fiabilité du comptage, la propriété et la protection des données.

L'adaptation aux spécificités du véhicule électrique de la réglementation applicable au véhicule dans son ensemble et ses composants reste à compléter

Le véhicule électrique relève tout d'abord du dispositif réglementaire en vigueur pour l'ensemble des véhicules routiers : système d'homologation par type accompagné des mesures relatives à la conformité de la production et complété par le contrôle technique périodique des véhicules.

En Europe, la directive 2007/46CE encadre l'homologation « par type » des véhicules routiers en s'appuyant sur une soixantaine de directives spécifiques, mais admet également en équivalence les règlements de la Commission économique des Nations unies pour l'Europe (CCE-ONU).

Le véhicule électrique est donc soumis aux mêmes contraintes réglementaires que les véhicules classiques à moteur thermique. Certains règlements prévoient toutefois des dispositions particulières pour prendre en compte sa spécificité. C'est le cas pour :

- le freinage ;
- la puissance ;
- la consommation d'énergie ;

- le choc frontal ;
- le choc latéral ;
- la sécurité fonctionnelle ;
- la protection contre les chocs électriques.

En particulier, le règlement spécifique pour les véhicules électriques (CEE-ONU R100), adopté en mars 2010, en cours de transposition au plan européen, est appliqué par anticipation par la France, notamment pour les divers modèles que les constructeurs nationaux s'apprêtent à mettre sur le marché dans les prochains mois. Il couvre essentiellement les exigences et les modalités correspondantes d'évaluation de la conformité en matière de sécurité pour les passagers et pour certains aspects d'impact environnemental. La mesure de la consommation d'énergie du véhicule fait l'objet du règlement R101 de la CEE-ONU, révisé en 2009 pour l'adapter à la mesure de la consommation du véhicule électrique. Les mesures, identiques pour tous les véhicules thermiques et électriques, sont effectuées selon des cycles simulant le roulage urbain et extra-urbain. Les normes ISO 8714 et ISO 8715, utilisées pour l'application de la R100 et de la R101, traitent des principales caractéristiques des véhicules électriques et de la mesure de leurs performances, notamment énergétiques.

❖ **Quelles mesures pour l'autonomie et la consommation électriques ?**

Ces deux performances clés du VE font l'objet de mesures validées lors des essais d'homologation en application des directives européennes, elles-mêmes dérivées du règlement R101 de la CEE-ONU. À l'heure actuelle, les cycles de roulage utilisés sont les mêmes que pour le véhicule thermique et simulent une conduite en sites urbain, extra-urbain et mixte. L'autonomie s'exprime en km et la consommation en Wh/km. Elles sont mesurées sur un véhicule ayant roulé 300 km avec une batterie pleine au départ et donc rechargeée au moins une fois. Il est toutefois admis qu'il s'agit là d'une première approximation. Des travaux sont en cours au niveau de l'ONU pour développer d'ici 2014 des cycles de roulage tenant compte des spécificités du VE, qui devraient aborder également les modalités de mesure et de communication de la charge résiduelle après une période de roulage (voir détails au chapitre 2).

Les composants électriques du véhicule peuvent être individuellement soumis à la directive « basse tension », et donc au marquage CE, éventuellement en appliquant des normes spécifiques tenant compte de leur utilisation à bord d'un véhicule.

Sécurité de la batterie et réglementation

La sécurité de la batterie n'est abordée par la réglementation que comme celle d'un composant électrique parmi d'autres et par le biais de l'homologation du véhicule dans son ensemble. Compte tenu de l'importance de ce composant à tous égards (coût, sécurité, durabilité, performance énergétique et impact sur l'environnement), une approche réglementaire spécifique devrait être envisagée (voir *infra*).

Habilitation électrique pour les interventions sur le véhicule électrique

Pour les interventions de réparation et de maintenance sur les véhicules électriques, une habilitation électrique des personnels est nécessaire, en application du décret n° 2010-1118 du 22 septembre 2010 « relatif aux opérations sur les installations électriques ou dans leur voisinage ». L'employeur doit remettre aux travailleurs concernés un carnet de prescriptions correspondant au travail à effectuer et basé sur la publication UTE C18-550. Cette publication est un recueil d'instructions de sécurité d'ordre électrique pour les opérations sur véhicules ou engins automobiles à motorisation électrique et énergie électrique embarquée en basse tension.

Fin de vie du véhicule et élimination des déchets électriques et électroniques

S'agissant du recyclage, le véhicule électrique, comme tout véhicule, est soumis à la directive 2000/50/CE du 18 septembre 2000 qui prévoit que, à horizon 2015, 95 % des véhicules hors d'usage devront pouvoir faire l'objet d'une récupération.

De plus, la batterie relève de la directive 2006/66/CE du 6 septembre 2006 relative aux piles et accumulateurs et à leurs déchets.

3 ■ Normes et standards

Comme on l'a vu, les réglementations fixent des exigences essentielles mais elles s'appuient pour les détails techniques sur des normes établies par les instituts de normalisation.

3.1. La normalisation européenne et internationale est encore largement en chantier

Les normes portent sur divers aspects qui permettent l'échange d'information et de données, l'évaluation de la performance et de la sécurité et l'interopérabilité. Elles couvrent donc :

- les termes et définitions ;
- les codes et nomenclatures ;
- les protocoles de codification, d'acquisition, de traitement et d'échange de données ;
- les prescriptions techniques (dimensions, sécurité, voire couleurs) pour permettre une interopérabilité mécanique et une connectivité entre divers composants et équipements ;
- les méthodes de mesure et d'essais et, le cas échéant, les critères de classement et d'acceptabilité en matière de performance, de sécurité ou d'impact sur l'environnement, assortis des modalités d'évaluation de la conformité ;
- les méthodes d'organisation et de management.

Une cartographie détaillée a été établie sous l'égide de l'AFNOR et validée par un groupe de travail composé notamment des deux principaux bureaux de normalisation concernés (BNA et UTE). Elle montre que la normalisation européenne et internationale est encore largement en chantier.

Sans entrer dans le détail du processus d'élaboration des normes, il convient de rappeler que, par principe, il s'appuie sur la formation, en général par itération, d'un consensus entre les acteurs concernés (« *stakeholders* »), validé par des votes nationaux. Il existe une hiérarchie normative entre le niveau national (AFNOR et bureaux de normalisation sectoriels en France), le niveau régional (européen dans le cas de la France, dans le cadre du CEN, du CENELEC et de l'ETSI) et le niveau international (ISO/CEI UIT). La représentation dans les travaux s'effectue par le biais de délégations nationales tant au plan européen qu'international, et donc *via* l'AFNOR et les bureaux de normalisation pour la

France. Des organisations gouvernementales ou professionnelles, régionales (par exemple Commission européenne ou CEE/ONU) ou internationales (par exemple OMS ou OICA), peuvent également participer aux travaux¹.

Si, dans le cas du véhicule électrique, il existe une volonté assez largement partagée dans l'industrie de créer un marché global en s'appuyant sur des normes internationales, plusieurs facteurs jouent en sens inverse :

- les délais de construction d'un consensus international sont longs (trois ans en moyenne pour créer une norme ISO ou CEI) ;
- le consensus peut se faire au prix de normes qui laissent encore plusieurs options, notamment pour tenir compte de différences structurelles, comme c'est le cas en particulier pour la distribution d'électricité (mono- ou triphasé, fréquence et voltage de l'électricité distribuée, etc.) ;
- des particularismes nationaux existent en matière de réseaux de distribution de l'électricité et de gestion des transports urbains ;
- le souci prime de développer d'abord les marchés nationaux et d'y donner une avance et des bases solides pour les industries nationales ;
- les intérêts industriels sont parfois divergents et en tout cas animés par la concurrence entre les constructeurs automobiles, les équipementiers, les fournisseurs d'électricité et les prestataires de service, dont les marchés et les marges peuvent être significativement impactés par les options normatives.

À cet égard, les États-Unis, la Chine et le Japon sont en avance pour le véhicule électrique, avec des choix normatifs structurants (installations de charge, prises et connecteurs) pratiquement déjà opérés, alors que l'Union européenne vient tout juste de mettre en place un dispositif d'harmonisation concernant les installations et les modalités de charge (voir *infra*). Aux États-Unis, la normalisation est le fait d'organismes sectoriels, accrédités par un organisme national, l'ANSI, qui assure l'interface avec le niveau international de normalisation. Il n'y a pas vraiment de normalisation régionale dans les zones des Amériques ou d'Asie-Pacifique dont font partie les États-Unis. La puissance de l'économie américaine lui permet de jouer sur les deux tableaux : soit en privilégiant les normes américaines (SAE, IEEE, UL ou NEMA dans le cas du véhicule électrique), soit en cherchant à influencer les normes internationales, par le biais de

[1] Voir à titre d'illustration la participation au comité technique TC 22 « véhicules routiers » de l'ISO : www.iso.org/iso/standards_development/technical_committees/list_of_iso_technical_committees/iso_technical_committee.htm?commid=46706.

la participation de ses organismes aux travaux de l'ISO et de la CEI. L'Union européenne pourrait faire de même mais sa prise de décision est plus lente et la représentation dans les travaux reste à base nationale. De plus, les options techniques prises par les constructeurs européens (y compris en France) et les différences en matière de réseaux électriques ne facilitent pas une action collective au niveau international.

Pour le véhicule électrique, des travaux de normalisation ont été entrepris depuis de nombreuses années au plan international, dans le cadre d'une collaboration et d'une répartition du pilotage et des travaux entre les constructeurs automobiles (leaders à l'ISO) et l'industrie électrotechnique (leaders à la CEI). Le protocole d'accord régissant cette répartition entre l'ISO et la CEI a été récemment mis à jour (révision en cours d'adoption) pour tenir compte du changement d'échelle attendu pour le déploiement du véhicule électrique lié aux nouvelles perspectives ouvertes par les batteries au lithium. Mais il faut bien admettre que cette répartition entre deux organismes n'est pas sans poser des problèmes d'interfaces et d'efficacité des travaux. De plus, l'ISO et la CEI collaborent avec l'UIT sur les questions de communication.

Trois chantiers stratégiques de normalisation méritent un développement particulier :

- les prises, connecteurs et chargeurs ;
- les batteries ;
- les protocoles et modalités de communication.

3.2. Des divergences et une pluralité de solutions pour les prises, les connecteurs et les câbles

Prises et connecteurs : une normalisation encore évolutive

Bien qu'il s'agisse d'un point crucial pour l'interopérabilité et l'économie du VE, il n'y a pas encore d'accord au plan mondial, pas même au plan européen. Aux considérations de choix de paliers de puissance de charge, qui ont des conséquences directes sur l'assurance et la flexibilité d'utilisation, s'ajoutent des différences entre pays pour les modes de distribution de l'électricité. Il faudra quelques années pour que la normalisation s'installe. L'infrastructure de recharge, en particulier dans le domaine public, doit donc être conçue pour pouvoir s'accommoder d'une certaine diversité initiale, tout en ménageant la possibilité d'ajustements ultérieurs.

Comme indiqué précédemment, il existe une diversité de modalités d'alimentation électrique et donc de charge qui rejoue sur la définition des prises et des connecteurs envisageables, lesquels sont également influencés par les usages nationaux en vigueur. Les paliers de charge ne font pas encore l'objet d'une normalisation, mais trois paliers sont communément envisagés en France :

- la charge normale à 3 kVA, de préférence en mode 3 (voir ci-dessous), qui doit être privilégiée pour la charge sur le point de stationnement principal, en périodes creuses, mais qui nécessite entre 5 et 8 heures pour un « plein » de la batterie ;
- la charge accélérée, à 22 kVA, qui doit permettre, sur la voie publique, voire sur des lieux privatifs pour des flottes spécifiques, d'obtenir un appont de charge, avec un « plein » en 1 heure environ, correspondant à la consommation d'une maison individuelle ;
- la charge rapide à 43 kVA (jusqu'à 63 kVA en triphasé), également pour un appont ou pour la gestion de flottes et qui permet un « plein » en 30 minutes, mais au prix d'une surveillance de l'installation et d'un appel d'électricité sur le réseau correspondant à la puissance d'un petit immeuble, avec un câble de connexion solidaire de la borne de charge et deux options : courant alternatif, donc pour chargeur embarqué, ou continu avec chargeur solidaire de l'installation de charge.

Des charges ultra-rapides sont envisagées (100 kVA et au-delà), mais relèvent encore de la recherche, et supposeraient résolus les problèmes d'impact sur la gestion du réseau électrique et de durabilité des batteries.

La norme NF EN 61851-1 définit en revanche quatre modes de charge pour les véhicules électriques, qui exigent tous un dispositif de coupure différentiel adapté (DDR) et un dispositif de protection contre les surintensités du côté de l'alimentation :

- mode de charge 1 : raccordement du VE au réseau d'alimentation à courant alternatif en utilisant une prise normalisée jusqu'à 16 A, côté alimentation, en monophasé ou triphasé, et en utilisant les conducteurs d'alimentation et de mise à la terre de protection. Il s'agit du mode de charge utilisé pour les précédentes générations de VE. C'est par conséquent celui des bornes de recharge aujourd'hui disponibles en France ;
- mode de charge 2 : raccordement du VE au réseau d'alimentation à courant alternatif en utilisant une prise normalisée, en monophasé ou triphasé, et en utilisant les conducteurs d'alimentation et de mise à la terre de protection

- avec une fonction pilote de commande entre le VE et le boîtier de contrôle intégré au câble, qui permet de vérifier l'intégrité du câble ;
- mode de charge 3 : raccordement direct du VE au réseau d'alimentation à courant alternatif en utilisant un système d'alimentation dédié, spécifique pour le VE (système d'alimentation du véhicule électrique : SAVE), où la fonction pilote de commande s'étend aux appareils connectés en permanence au réseau d'alimentation. Il comporte un quatrième fil pour garantir la continuité terre entre le véhicule et la borne. Il nécessite une prise spécifique, par exemple un connecteur correspondant à la norme CEI 62 196-2 type 3 ;
 - mode de charge 4 : raccordement indirect du VE au réseau d'alimentation à courant alternatif en utilisant un chargeur externe où la fonction pilote de commande s'étend aux appareils connectés en permanence à l'alimentation en courant alternatif.

La continuité de la mise à la terre entre le SAVE et le véhicule doit être vérifiée en permanence pour les modes de charge 2, 3 et 4.

Le mode de charge 1 est adapté pour les petites puissances de charge et donc pour les véhicules qui s'en contentent (deux-roues, quadricycles, véhicules hybrides rechargeables), au niveau de charge limité à moins de 3 kVA avec un courant qui doit être inférieur à 16 A sur les prises domestiques. Il permet l'utilisation des prises à trois broches communément disponibles à domicile, d'ores et déjà employées pour les véhicules électriques de l'ancienne génération. Le mode de charge 2 permet de charger un véhicule en mode 3 avec une infrastructure en mode 1, mais doit être considéré comme un mode transitoire ou de dépannage réservé à des applications domestiques de puissance inférieure à 3 kVA. Le consensus en France est donc de prescrire le mode de charge 3, qui assure une meilleure sécurité, en tous cas pour les véhicules qui acceptent des niveaux de charge plus élevés. Cela implique une prise dédiée (« *wall box* ») et, en tout état de cause, un contrôle de l'installation électrique pour vérifier en particulier les prises de terre. Le mode de charge 4 correspond à l'alimentation en courant continu *via* des bornes de charge rapide équipées d'un chargeur.

Un débat subsiste au sein des instances de normalisation sur les limitations éventuelles apportées par les prises domestiques ordinaires conformes à la norme NF C 61 314. Leur capacité de charge au courant maximal de 16 A pourrait être limitée dans le temps en raison des risques d'échauffement et en

cas de répétition de charges : il est donc admis que le courant appelé devrait être inférieur pour les charges normales répétées de longue durée, mais le niveau de limitation du courant appelé fait encore débat (limitation à 13 A, voire à 10 A).

Si la norme spécifique aux prises pour véhicules électriques (NF EN 62 196-1) en donne les caractéristiques générales et la typologie, elle ne statue pas sur les caractéristiques dimensionnelles, ni sur le mode de communication entre le véhicule et l'installation de charge pour assurer le contrôle et la sécurité de la charge ou la correspondance entre niveau de charge et type de prise. L'un des objectifs du *focus group* mis en place pour l'exécution du mandat européen de normalisation (voir *infra*, section 3.5.) est donc de converger vers une norme européenne unique tant pour la prise côté installation que pour la prise côté véhicule.

💡 Prises EV Plug Alliance et Mennekes : concurrence ou complémentarité ?

Deux solutions opérationnelles émergent en Europe : EV Plug Alliance du consortium européen Schneider Electric, Legrand et SCAME (Italie) et prise Mennekes soutenue par les constructeurs allemands. Elles comportent toutes deux sept broches, cinq correspondant au passage de courant alternatif mono- ou triphasé et à une ligne de terre, plus une ligne de contrôle de mouvement du véhicule et une ligne de communication pour le contrôle de la charge. On ne sait pas clairement aujourd'hui si ces deux options sont en concurrence ou pourraient être complémentaires, avec l'EV Plug côté borne de charge et la prise Mennekes côté véhicule. Une différence importante entre ces deux modèles réside dans l'adjonction d'un obturateur pour l'EV Plug, pour assurer la conformité à la réglementation française, ce qui n'est pas le cas pour la prise Mennekes.

Aux États-Unis, la norme SAE J1772, dérivée d'un modèle japonais, « Yazaki », semble devoir s'imposer au moins sur les marchés américains et asiatiques, mais ne permet qu'une alimentation en courant monophasé alternatif, avec donc cinq broches seulement. Toutes ces prises sont adaptées aux charges normales ou accélérées en courant alternatif *via* un chargeur embarqué, mais pas aux charges rapides en courant continu *via* un chargeur lié à l'installation de charge. Pour ces dernières, le consortium d'origine japonaise CHAdeMO a développé une prise spécifique. Des adaptateurs devraient permettre

l'interopérabilité mais une normalisation aussi poussée et internationale que possible est bien sûr préférable.

Le branchement sur le véhicule lui-même se fait par l'intermédiaire d'un câble soit nomade, soit relié au véhicule, soit à l'installation de charge. Il est évidemment souhaitable que la prise (femelle) sur le véhicule puisse être utilisée directement pour la charge sans recours à un adaptateur, qu'on ne peut toutefois pas exclure en attendant que des normes internationales précises s'imposent. Plusieurs constructeurs européens et japonais s'apprêtent d'ailleurs à livrer des véhicules rechargeables tant en courant alternatif qu'en courant continu *via* une prise véhicule unique, mais avec divers câbles de connexion nomades et une connexion *via* un câble lié à l'installation pour la charge rapide.

La charge normale à 3 kVA est assurée par un câble nomade, fourni par le constructeur et rendant l'accès aux bornes indépendant de la nature du connecteur côté véhicule. Les constructeurs automobiles prévoient de commercialiser un ou plusieurs câbles par véhicule.

Pour les puissances supérieures, il est essentiel de converger vers un connecteur unique au moins au niveau européen. Pour la charge accélérée à 22 kVA, on pourra en effet avoir soit un connecteur sans câble attaché, soit, dans certains pays, un connecteur avec câble attaché, qui devront tous deux permettre un branchement sécurisé pour la charge du véhicule. Pour la charge rapide à 43 kVA, il ne peut s'agir que d'un câble attaché, compte tenu de l'impact de la puissance à fournir sur le dimensionnement et donc le poids et l'encombrement du raccordement entre la borne et le véhicule.

D'une façon générale, il faut s'attendre à des évolutions notables concernant les systèmes de recharge et la normalisation des connecteurs, ce qui ne facilite pas les choix à court terme pour l'infrastructure et incite donc à un déploiement des installations de charge accélérée et rapide permettant des adaptations ultérieures.

3.3. Des normes d'essais et de performances à compléter pour évaluer la sécurité et les performances des batteries

La grande majorité des constructeurs a choisi la technologie lithium-ion pour les batteries d'alimentation des véhicules électriques, avec plusieurs variantes. Celle-ci offre en effet une plus grande énergie spécifique (énergie/masse) et une meilleure densité d'énergie (énergie/volume) par rapport aux batteries utilisées dans les véhicules électriques de la génération précédente. De plus, les

batteries au lithium sont réputées ne pas souffrir des effets de mémoire liés à l'accumulation des cycles de charge et elles n'émettent pas d'hydrogène.

Actuellement, la réglementation ne traite qu'indirectement des batteries, par des dispositions en matière de sécurité et de performance énergétique globales du véhicule, à l'exception d'une directive européenne spécifique qui couvre le recyclage (voir *supra*, section 2.2.). Un groupe *ad hoc* sur la sécurité passive a été mis en place au sein de la CEE-ONU : il s'agit de préciser les exigences pour aller au-delà des dispositions actuelles qui prescrivent que, lors des essais de choc (*crash tests*), la batterie ne doit pas engendrer plus de risques que pour le véhicule thermique. En France, l'UTAC et l'INERIS pilotent un groupe de travail sur l'ensemble des risques de la filière véhicules électriques et l'INERIS vient d'établir un programme d'essais et un cahier des charges pour une certification de la sécurité qui aille au-delà des exigences réglementaires en vigueur (certification « ELLICERT », qui est une certification de type, donc sans suivi des fabrications). Le règlement CEE ONU R100 couvre en effet la sécurité électrique des biens et des personnes contre les chocs électriques en utilisation. Les règlements CEE ONU 12, 94 et 95 reprennent les prescriptions électriques du règlement 100 afin d'assurer la sécurité des occupants et des tiers en cas d'accident de circulation et prescrit donc des tests électriques à la suite d'un *crash test*. La certification volontaire ELLICERT prévoit de prendre en compte d'autres types de dysfonctionnements ou d'agressions électriques, mécaniques ou thermiques que peut subir le véhicule (incendie, immersion, apparition d'un défaut électrique dans le pack) et définit les tests abusifs correspondants, dont certains issus de la réglementation sur le transport des matières dangereuses.



La certification ELLICERT des batteries délivrée par l'INERIS

La certification ELLICERT des batteries (cellules et packs) pour véhicules électriques et hybrides rechargeables vise à apporter aux utilisateurs une garantie en matière de sécurité globale en reconnaissant à ces matériels un niveau de résistance plus ou moins important à des dysfonctionnements ou agressions électriques, mécaniques ou thermiques. Cette certification, qui se fait pour l'instant sur le mode volontaire, conduit à la délivrance de certificats, pour un niveau ou classe de sécurité (3 classes A, B et C) défini en fonction des exigences requises par ailleurs par les constructeurs automobiles. Elle vise notamment les technologies Li-ion pour ces batteries.

Les types de dysfonctionnements ou d'agressions retenus ne sont pas ceux des règlements d'homologation des véhicules CEE-ONU 12, 94 et 95 qui reprennent les prescriptions électriques du règlement 100 afin d'assurer la sécurité des occupants et des tiers dans le véhicule en fonctionnement normal, en situation de recharge et à la suite d'un crash. De même, les développements de ces règlements prévus sur la période 2010-2012 au sein de la CEE-ONU (WP29/GRSP, groupes ELSA et RESS) ne font pas double emploi avec la certification ELLICERT.

Les tests de sécurité retenus dans le référentiel de sécurité ELLICERT sont issus de plusieurs standards internationaux – USCAR, UL, SAE, réglementation du transport des matières dangereuses – qui, pris isolément, n'apportent pas le même niveau de couverture des différents dysfonctionnements ou agressions.

La certification ELLICERT délivrée par l'INERIS est destinée à être portée au niveau international par le jeu d'accords avec des organismes étrangers, européens dans un premier temps, actifs en matière de sécurité des batteries. Son processus dure au minimum un à deux mois, s'il s'agit d'une nouvelle certification et si l'ensemble des données utiles sur les batteries et des résultats d'évaluation (tests) est disponible. Si des tests doivent être engagés en nombre assez important, un délai de six mois maximum peut être requis. Ces délais, habituels pour une certification, peuvent être significativement réduits si le processus est uniquement documentaire, par exemple en cas d'extension ultérieure de la certification à un type très proche d'un type déjà certifié. Les premières certifications sont attendues dès le premier semestre 2011.

La normalisation va devoir intégrer ces travaux, mais elle traite déjà :

- des caractéristiques des éléments d'accumulateurs lithium-ion pour la propulsion des véhicules routiers électriques (NF EN 62660-1), notamment pour les essais de performance ;
- des essais de fiabilité et de mauvais traitement pour les éléments d'accumulateur lithium-ion (projet CEI 62660-2) ;
- des essais de batteries au lithium utilisées pour la charge rapide (ISO 12405) ;
- des exigences en matière d'isolement électrique, d'émissions d'hydrogène et autres produits et de protection des occupants en cas de choc et contre les dangers électriques en général (ISO 6469).

La série NF EN 61982 ne concerne pas les accumulateurs au lithium. Elle traite des paramètres d'essai, des essais de performance de décharge, d'endurance dynamique et de durée de vie pour tous types d'accumulateurs (excepté lithium) pour la propulsion de véhicules électriques.

Aux États-Unis, tant la SAE côté constructeurs que les Underwriters Laboratories côté équipementiers ont publié des normes sur les batteries pour véhicules électriques (SAE J-1766 pour le crash test et SAE J-2464 et UL-2580) en parallèle des travaux en cours à l'ISO et à la CEI. L'harmonisation internationale s'annonce donc ardue, d'autant que les données scientifiques sur la reproductibilité ou la représentativité des essais et la pertinence des critères d'acceptation qui en découlent foisonnent, tandis que la technologie des batteries est elle-même en pleine évolution. On est typiquement dans le cas où normalisation et innovation doivent progresser de conserve.

3.4. Des travaux à accélérer pour définir et harmoniser les protocoles et modalités de communication

Le véhicule électrique peut bénéficier de l'ensemble des technologies de communication, de repérage et d'identification par voie hertzienne déjà en usage pour les véhicules thermiques : téléphone portable (y compris en utilisant la technique NFC : « *near field communication* »), radio (RFID : cf. télépéage), Wi-Fi ou géolocalisation (GPS).

Les normes et standards déjà en vigueur pour ces technologies s'appliquent *ipso facto* au véhicule électrique. La conformité des équipements installés d'origine est garantie par le constructeur. Les équipements ajoutés après l'achat doivent porter le marquage CE. L'utilisation de ces techniques dans un véhicule électrique n'apporte aucune contrainte supplémentaire, même si elle peut nécessiter des adaptations.

Les différents niveaux de communication à assurer pour l'exploitation du véhicule électrique sont les suivants :

- communication entre l'installation de charge et le réseau pour le comptage de l'électricité délivrée et, le cas échéant, l'optimisation de la fourniture (déclenchement, régulation) : cette communication relève du cas général et des solutions développées pour promouvoir les *smart grids* par la mise en place des « compteurs intelligents » et des solutions de maîtrise active de la demande d'électricité. Dans une phase ultérieure, elle pourra servir de support pour la mobilisation de la capacité de stockage, voire pour la

restitution d'énergie emmagasinée par la batterie pour soutenir la flexibilité du réseau, fonction qui sera cruciale lorsque le parc de véhicules électriques sera significatif (au-delà de 2020) ;

- communication entre l'installation de charge et le véhicule pour anticiper, optimiser et sécuriser la recharge et, le cas échéant, permettre d'effectuer la transaction commerciale ;
- communication entre le véhicule et le réseau d'installations de charge pour permettre à l'usager de localiser, de choisir et, éventuellement, de réserver sa recharge.

Le seul aspect propre au véhicule électrique est la communication entre l'installation de charge et le véhicule, pour deux fonctions :

- la gestion de la charge (en mode 3), par le biais du fil pilote dédié qui permet à la borne d'indiquer le niveau de courant pouvant être fourni et assure également la continuité du fil de terre : ce mode de communication est régi par la norme CEI 61851-1 publiée en 2010 ;
- la communication entre le véhicule et la borne de charge pouvant utiliser un signal tel que le CPL (courant porteur en ligne) qui permet cette relation bilatérale. Cette voie autorise un contrôle complet de la charge et, de plus, la gestion de la facturation. Elle pourrait même permettre la fourniture de données de tous ordres et de services additionnels tels que produits audio et vidéo (haut débit). Un projet de norme ISO/CEI 15118 a été mis en chantier dans le cadre d'un groupe de travail commun ISO/CEI ; sa publication est espérée pour 2012.

Il faut noter que la SAE prépare de son côté une série de normes sur la communication entre le VE et le réseau (SAE J-2836 et J-2847).

Pour les autres fonctions de communication, des solutions devraient pouvoir dériver de modèles et techniques existants pour d'autres applications, y compris pour les aspects « *roaming* » (c'est-à-dire pour repérer et utiliser les bornes de charge ouvertes au public puis régler par un moyen unique l'opérateur de charge quel qu'il soit). Il faudra tenir compte toutefois des petits montants des livraisons unitaires d'électricité, qui devraient inciter à privilégier l'identification par téléphone portable, NFC ou RFID, associée à un abonnement, plutôt que les règlements unitaires par carte bancaire, trop coûteux à mettre en œuvre. Il est à noter à cet égard que les travaux et normes du comité ISO TC204 (à l'origine notamment des normes pour le télépéage) et du comité homologue de l'ETSI

sur les systèmes de transports intelligents devraient être utilisés préférentiellement¹.

Comme la borne de charge constitue le point de passage principal pour la fourniture d'électricité dans le domaine public, il conviendra de prévoir son adaptation en fonction des options prises par la normalisation.

3.5. Des mandats européens de normalisation qui sont vitaux pour ouvrir un marché domestique significatif à l'industrie européenne

❖ **La normalisation européenne est desservie par des différences structurelles de distribution de l'électricité et des options industrielles différentes**

Malgré les alliances annoncées entre constructeurs et la concertation franco-allemande officielle, des divergences apparaissent, notamment en raison des différences structurelles concernant les réseaux électriques évoquées plus haut et/ou des choix stratégiques des constructeurs automobiles. Il faudra donc une volonté politique pour aboutir, car l'existence d'une normalisation européenne, s'appuyant autant que possible sur les normes internationales ISO et CEI et assurant l'interopérabilité transfrontalière des recharges et l'optimisation de l'industrialisation des VE, est une condition nécessaire au succès de son déploiement en Europe et à la compétitivité de l'industrie automobile européenne sur son propre marché et à l'exportation.

L'harmonisation des réglementations au niveau européen étant fondée sur le principe de la « nouvelle approche », un mandat spécifique a été confié aux organismes européens de normalisation (CEN, CENELEC, ETSI) afin d'élaborer des normes européennes harmonisées qui pourront notamment être utilisées comme présomption de conformité aux directives correspondantes. Il s'agit du mandat M468 concernant un système de charge commun pour les véhicules électriques, assurant la sécurité, l'interopérabilité et le rechargement intelligent. Il a été notifié en mai 2010 et son exécution, placée sous l'égide d'un « *focus group electromobility* » présidé par la France, ne fait que commencer. Les premières conclusions sont attendues pour mars 2011, en particulier sur la terminologie, les connecteurs, les batteries, les modes de communication et les modes de charge.

[1] Voir www.iso.org/iso/standards_development/technical_committees/list_of_iso_technical_committees/iso_technical_committee.htm?commid=54706.

Deux autres mandats de normalisation européenne intéressent le déploiement du véhicule électrique : le mandat M441 concernant les compteurs intelligents, notifié en mars 2009 ; le mandat M453 sur les systèmes coopératifs pour les transports intelligents. De plus, un projet de mandat est en cours d'élaboration pour les réseaux intelligents (*smart grids*).

3.6. Une position française en principe forte dans la normalisation européenne et internationale mais pénalisée par les divergences stratégiques des constructeurs nationaux

En ce qui concerne le pilotage des travaux européens et internationaux de normalisation, la France paraît à première vue très bien placée : secrétariat du TC 22 « véhicules routiers » de l'ISO, présidence et secrétariat du TC 69 « véhicules électriques » de la CEI, présidence et vice-présidence du *focus group* qui coordonne les travaux sur le véhicule électrique des instituts européens de normalisation, présidence et secrétariat du TC 301 « véhicules routiers » du CEN. Toutefois, l'Allemagne s'est également bien positionnée en prenant l'animation des sous-comités techniques les plus importants, tant à l'ISO qu'à la CEI ou dans le cadre du mandat européen.

L'AFNOR a pris l'initiative en septembre 2010 de mettre en place une instance stratégique pour tous les travaux et réflexions relatifs à la normalisation pour le véhicule électrique. Ce groupe rassemble, autour de l'AFNOR et des principaux bureaux de normalisation compétents (BNA et UTE), des représentants de tous les acteurs industriels et institutionnels impliqués dans le déploiement du véhicule électrique. Ce groupe n'a pas vocation à prendre part lui-même aux travaux de normalisation proprement dits, mais il doit permettre une approche nationale, systémique et concertée pour l'élaboration des normes nécessaires à ce déploiement et assurer une bonne articulation entre réglementation, normes et standards, ainsi qu'avec les processus d'évaluation de la conformité (homologation ou certification). Il doit également permettre une meilleure coordination des positions françaises aux niveaux européen et international.

3.7. Des standards qui sous-tendent des modèles alternatifs de déploiement du véhicule électrique

Comme indiqué au début de ce chapitre, on distingue les normes, qui reposent sur un large consensus, des standards développés au niveau d'entreprises ou de groupements d'entreprises, qui peuvent, ou non, incorporer des technologies propriétaires. Nous en avons déjà cité plusieurs : EV Plug

Alliance, Mennekes, Yazaki et CHAdeMo pour les prises, ou la certification ELLICERT pour les batteries.

Trois initiatives correspondant à des approches alternatives, plus systémiques, du déploiement du véhicule électrique et conditionnées par la mise en œuvre de standards associés, méritent d'être signalées :

- « Better Place™ », service de mobilité qui porte sur l'ensemble de la fourniture du service de charge des véhicules et sur la mise à disposition de batteries en bon état ; il comporte une recharge par échange de batteries dans des stations spécialisées et un système de gestion spécifique de la mobilité. Le développement de ce modèle, encore voué à des périmètres urbains bien définis ou à la gestion de flottes, suppose des partenariats avec les constructeurs automobiles et ne pourra prospérer à terme que si une standardisation, voire une normalisation, des dimensions du positionnement, de la fixation et des caractéristiques mécaniques, électriques et géométriques des batteries permet d'accroître la rentabilité des stations d'échange en multipliant les véhicules pouvant s'y approvisionner ;
- le concept « Modulowatt™ », qui pousse à l'extrême le concept de l'« e-mobilité ». Il est axé sur la facilitation, voire la priorité, du stationnement sur la voie publique pour le véhicule électrique. Les bornes de charge sont spécifiques et conçues avec un système d'amarrage automatisé du véhicule à la borne. Le système est également standardisé côté véhicule. Il permet la charge de plusieurs véhicules à partir de la même borne et le remorquage de grappes de véhicules. La fonction de déplacement automatique du véhicule pour assurer l'amarrage peut également être utilisée pour automatiser le transfert vers des zones de parking collectif et apporter ainsi un avantage supplémentaire par rapport au véhicule thermique en optimisant les temps et espaces de parking collectif. Un pilote de borne d'amarrage a été présenté au Mondial de l'Automobile à Paris à l'automne 2010. Le succès de ce concept suppose une ouverture internationale pour espérer une taille critique et l'adhésion d'acteurs majeurs, tant du côté des constructeurs automobiles que des équipementiers ou, surtout, des collectivités locales, car il suppose l'éviction de fait du véhicule thermique des zones de parking ouvertes au public et dotées de prises de charge. Des standards spécifiques sont nécessaires tant pour la charge que pour la gestion du véhicule et de son stationnement ;
- « EV Ready™ » : cette initiative, lancée par Renault et Schneider Electric en juin 2010, vise à promouvoir un programme de qualification volontaire

des systèmes de recharge, en s'appuyant sur les réglementations et les normes existantes évoquées ci-dessus, notamment pour pallier le fait qu'elles laissent des options ouvertes. Cette qualification, en précisant et en validant chaque fois que nécessaire les choix techniques, a pour objectif d'assurer une homogénéité, une interopérabilité et une sécurité des bornes de charge, en particulier au niveau d'un périmètre géographique donné.

4 ■ Recommandations

Le panorama ainsi dressé de la situation et des travaux en cours en matière de réglementations, de normes et de standards pour le véhicule électrique montre à la fois que beaucoup de points sont déjà couverts, mais qu'il reste du chemin à parcourir. Innovation, tant technique que commerciale, et normalisation devront être développées en parallèle et en fonction des retours d'expérience. Du seul point de vue de l'optimisation de la production, la normalisation a déjà largement contribué au développement et au progrès de l'industrie et de l'utilisation du véhicule thermique. On escompte donc un apport similaire, voire supérieur, de la normalisation dans cette nouvelle étape de l'industrie automobile.

En conclusion de cette analyse de la situation actuelle et des perspectives réglementaires et normatives pour le déploiement du VE, quelques recommandations peuvent être formulées.

RECOMMANDATIONS

1. Adopter une approche plus systémique du déploiement du véhicule électrique pour évaluer et satisfaire les besoins réglementaires et normatifs correspondant : à cet égard, il est recommandé que le groupe stratégique sur le véhicule décarboné qui vient d'être créé par l'AFNOR permette effectivement, par sa composition et son mandat, une approche transversale et en perspective de l'ensemble des travaux de normalisation, tenant compte des besoins liés à la réglementation et à l'évaluation de la conformité, et ce pour les divers aspects du déploiement du VE et du VHR. La France doit œuvrer pour qu'il en soit de même au plan européen, ainsi qu'à l'ISO et à la CEI.
2. Lever les dernières ambiguïtés d'interprétation sur les types de prises et modes de charge à utiliser pour les installations de charge normale (3 kVA) : la réglementation (norme NFC 15-100) et les normes concernant

les prises permettent un certain flou et il faut expliciter les modalités et les limitations de charge normale à domicile.

3. Porter une attention égale dans les travaux de normalisation à la sécurité et à l'interopérabilité, l'une ne devant pas être assurée au détriment de l'autre. Cela passe notamment par une priorité à donner à l'utilisation de prises dédiées pour la recharge des véhicules électriques tant à domicile que dans les lieux publics, et par une ergonomie et une signalétique particulièrement soignées – soutenue par la normalisation – des prises et connecteurs de charge.

4. Clarifier la situation des installations de charge dans le domaine public vis-à-vis des diverses réglementations applicables : sécurité électrique, compatibilité électromagnétique, installations classées, ERP, risque incendie. Des interrogations subsistent en effet sur le régime réglementaire pour l'implantation et l'installation des bornes et plateformes de charge accélérée et rapide, ainsi que pour les stations d'échange de batteries.

5. Entreprendre rapidement une normalisation des paliers de charge, au moins au niveau européen, comportant une correspondance claire pour les types de prises, de connecteurs, de câbles et de chargeurs, et pour les modes de charge associés.

6. Faciliter et sécuriser la tendance naturelle, démontrée par les expérimentations en cours, à recharger sur le lieu de stationnement principal la nuit. Pour cela, en plus d'éventuelles conditions tarifaires différencierées pour l'électricité, il faut expliquer et sécuriser les conditions de charge à domicile, en parking collectif ou sur voirie dans les emplacements mis à la disposition du public. Outre un effort de communication, il convient d'établir une documentation technique et un référentiel normatif pour l'installation et la sécurisation de prises dédiées et leur contrôle. Ce référentiel devrait servir de base pour la qualification des entreprises prestataires et des mesures incitatives. C'est en effet la condition pour que les charges aient lieu essentiellement en périodes creuses et pour que la réduction des émissions de gaz à effet de serre soit effective. La normalisation doit également assurer une bonne insertion de la charge du véhicule électrique dans la gestion plus générale de l'énergie consommée à domicile et dans les réseaux domiciliaires correspondants. À cet égard, une collaboration entre Qualibat et Qualifelec devrait être encouragée pour développer en cohérence les qualifications des entreprises d'installation et de maintenance.

7. Organiser une coordination étroite et un échange d'informations et d'expérience permanent entre les différentes expérimentations et déploiements régionaux qui ont démarré en France ou vont être engagés dans le cadre du plan national pour le véhicule décarboné, en particulier pour clarifier et adapter les dispositions réglementaires, promouvoir l'interopérabilité interrégionale et valider les solutions normatives. Un portail dédié pourrait être mis en place par le ministère chargé des transports, comportant un volet spécifique pour la réglementation, les normes et les standards.
8. Porter une attention particulière, assortie de moyens, aux travaux de recherche prénormative en France, notamment sur les caractéristiques des installations de charge, la qualification des batteries, la validation des protocoles de communication et les systèmes de comptage et de facturation, afin que les positions françaises dans l'élaboration des réglementations et normes européennes et internationales soient étayées par des données scientifiques et techniques. On a évoqué plus haut le programme « *Green car* » du 7^e programme-cadre européen de R & D : il faut s'assurer que les laboratoires français y participent activement, en particulier pour les travaux relatifs aux batteries, aux perturbations radioélectriques, à l'interopérabilité et aux protocoles de communication, ainsi que ceux relatifs à la mesure des performances énergétiques et environnementales.
9. Promouvoir le développement coordonné, du moins au plan européen, de normes d'essais et de mesure de performance des batteries, abordant l'ensemble des caractéristiques, d'ailleurs souvent corrélées, de performance énergétique, mécanique et thermique, de sécurité, de fiabilité (en particulier impact de la répétition des charges accélérées et rapides), d'impact environnemental, d'interopérabilité et, à terme, d'interchangeabilité. Les normes ou travaux normatifs en cours abordent en effet séparément les aspects performances et les aspects sécurité, et l'homologation réglementaire ne concerne que les conséquences d'un crash test et indirectement la performance à travers des mesures de consommation électrique pour des cycles normalisés (urbain et extra-urbain). Or la performance, la durabilité, l'impact environnemental et la sécurité des batteries sont des éléments d'influence majeure sur le succès économique et sociétal des véhicules électriques.

Demande et marché potentiel des véhicules électriques

Au moment où l'industrie automobile commence à sortir de la crise, les véhicules électriques sont souvent présentés – sans que soit précisé s'il s'agit de tout électriques (VE), d'hybrides (VH) ou d'hybrides rechargeables (VHR) – comme la panacée permettant le renouvellement de la demande mondiale tout en réduisant les émissions de gaz à effet de serre. La fragilisation financière des ménages et la montée des aspirations à de nouvelles formes de mobilité induites par les enjeux environnementaux bousculent le statut de l'automobile comme objet emblématique de l'imaginaire collectif, ce qui engendre des inquiétudes sur les ventes futures. Dans un contexte de pression continue pour limiter les émissions polluantes, les véhicules électriques sont également présentés comme les mieux à même de répondre à l'intérêt croissant des consommateurs pour la question environnementale. Parallèlement, l'apport des technologies de l'information à la transformation des habitudes quotidiennes renouvelle le rapport à la mobilité¹, offrant une niche de développement au VE et au VHR sous forme de prestation de services. Mais le passage du produit de niche au marché grand public demeure tributaire de différentes évolutions plus ou moins prévisibles : les avancées technologiques, les impulsions gouvernementales, le développement des infrastructures, le prix du pétrole et de l'électricité, et surtout, le comportement des consommateurs.

Prendre en considération ces facteurs amène à envisager un développement relativement faible du parc de VE à moyen terme, principalement centré sur des seconds véhicules à usage urbain et suburbain ainsi que sur des flottes d'entreprise, avec la perspective d'une plus forte expansion dans un avenir

[1] Voir notamment Centre d'analyse stratégique [2010], *Les nouvelles mobilités : adapter l'automobile aux modes de vie de demain*. rapport de la mission présidée par Olivier Paul-Dubois-Taine, Paris, La Documentation française.

plus lointain. Le développement des infrastructures et les retours d'expérience des premiers particuliers et entreprises seront fondamentaux pour assurer l'essaimage de ces véhicules.

1 ■ Entre croissance forte dans les pays émergents et saturation de la demande dans les pays développés

1.1. La crise économique souligne le caractère atone du marché automobile dans les pays développés

La crise a mis au jour une situation potentiellement critique pour les constructeurs dans les années à venir, marquée par des dynamiques de demande de plus en plus contrastées entre économies matures et économies émergentes, et par une exacerbation de la concurrence.

En Europe, les immatriculations, après avoir reculé de 7 % en 2008, ont plutôt augmenté en 2009 (+ 4 %) grâce aux primes à la casse des différents États de l'Union européenne, avant de rechuter en 2010 (− 3,6 % sur les deux premiers trimestres). En France, les immatriculations de voitures particulières ont légèrement fléchi en 2008 (− 0,7 %) et fortement augmenté en 2009 (+ 10,7 %) avant de redescendre, avec + 0,8 % de croissance sur les deux premiers trimestres 2010. Cette relative résistance de la demande est largement imputable à l'instauration du bonus/malus en 2008 puis de la prime à la casse en 2009 (600 000 bénéficiaires à ce jour), qui ont fortement stimulé le marché français. Cette bonne gestion du choc conjoncturel, qui marque avant tout une anticipation de la demande future, ne doit pas cacher une demande française de véhicules neufs particulièrement atone depuis 2000 (− 0,4 % en moyenne annuelle de 2000 à 2008).

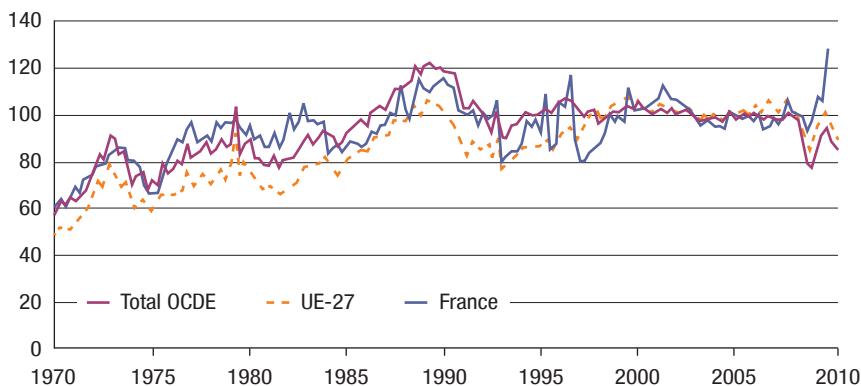
Dans les pays développés, on remarque que la demande automobile a atteint un palier depuis les années 1990 (*voir graphique suivant*). Le secteur se trouve aujourd'hui à un tournant : les consommateurs optent de plus en plus pour des petits véhicules économies, et n'accordent plus autant de place à l'automobile comme « achat-plaisir » ou marqueur social.

En France, cette atonie s'explique principalement par la saturation du marché et par le changement de comportement des consommateurs. En 2008, 83 % des ménages possèdent au moins une voiture, et la progression du taux d'équipement ne cesse de ralentir depuis 2000, date à laquelle 80 % des ménages disposaient déjà d'une voiture. Cette saturation du marché entraîne

une très faible croissance du parc (moins de 1 % depuis 2002) et son vieillissement : l'âge moyen des véhicules est désormais de 8,3 ans (au lieu de 5,8 ans en 1990). De plus, l'imaginaire collectif favorable à l'automobile recule, et avec lui l'âge moyen de l'acheteur de voiture neuve (51 ans en 2008). Cet essoufflement apparent du désir de possession favorise le marché d'occasion : après un recul en 2009, il repart à la hausse en 2010¹. Aujourd'hui, les véhicules neufs sont principalement achetés par les entreprises ou les ménages à revenu élevé. Cette plus faible propension à payer se traduit également par l'essor des véhicules « *low cost* », aux fonctionnalités simples, peu économes en carburant et au prix très compétitif. Lancés par Renault en 2004 avec la Logan, ils représentaient 23 % des volumes de ventes de Renault en 2009 (cinq modèles). Enfin, la crise actuelle a accéléré la prise de conscience du coût économique et écologique de l'automobile : en 2009, 62 % des Français la considèrent comme une contrainte et non un plaisir, alors qu'ils étaient 32 % à le penser en 2004². Cette évolution pourrait être un frein important au développement des nouvelles motorisations, si celles-ci n'apportent pas de progrès significatif en matière de coût ou de commodité d'usage.



Évolution des immatriculations de véhicules dans les pays développés



Source : OCDE Main Indicators, Index

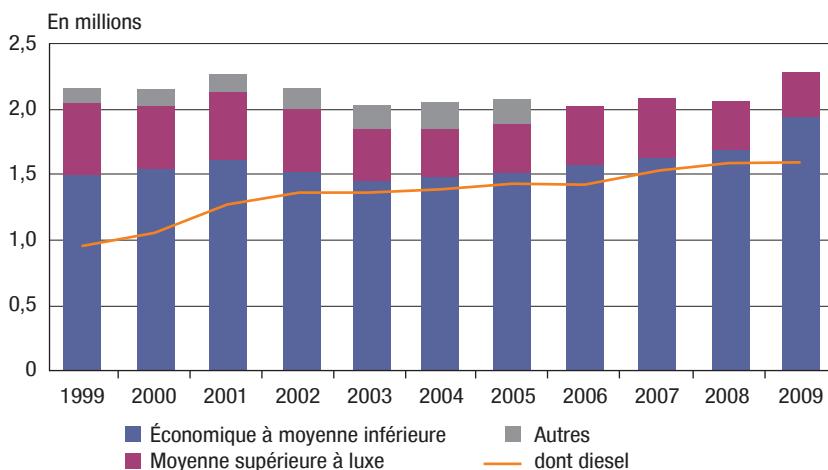
[1] Les véhicules d'occasion représentent 17 % du parc en 2009. Il s'en vend 2,6 pour un véhicule neuf depuis 2000, rapport diminué par l'effet de la prime à la casse en 2009.

[2] Enquête issue de l'Observatoire Cetelem de l'automobile [2010], « Automobile : la *low cost* attitude ? ».

Enfin, la hausse du prix du pétrole n'a fait que renforcer une tendance qui date des années 1990, à savoir le recul des ventes de véhicules de gamme moyenne ou supérieure, en faveur des petites voitures économiques et des véhicules diesel, tendance encore amplifiée par le bonus/malus écologique. Cette descente en gamme et en prix implique de fortes baisses de chiffres d'affaires et de profitabilité, et fait craindre aux professionnels une relégation de l'automobile à un statut fonctionnel et non plus identitaire ou représentationnel.



Répartition de gammes dans les immatriculations françaises



Source : CCFA (changement de nomenclature en 2006 reclassant les « Autres » (monospaces) dans les autres catégories)

1.2. Les pays émergents sont porteurs d'une forte demande, pas nécessairement écologique

Dans les pays émergents, les volumes d'ores et déjà atteints et les taux de croissance constatés¹ permettent un certain optimisme sur le niveau des ventes. La croissance de la population assurera une demande continue jusqu'à l'équipement d'une partie des marchés (*voir graphique suivant*). On assiste dorénavant à une deuxième phase de ce processus de polarisation de la demande automobile du marché global. Alors que les constructeurs coréens, brésiliens, indiens

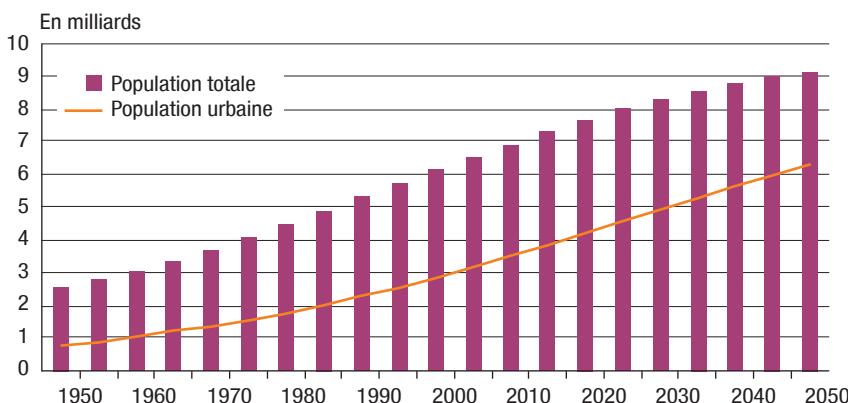
[1] La demande chinoise a par exemple effectué un bond de 46 % en 2009 à 13,6 millions d'unités, année où le marché français représentait 2,3 millions de véhicules.

et chinois gagnent continûment des parts de marché¹, les constructeurs mondiaux se tournent de plus en plus vers les « nouveaux » émergents : l'Amérique centrale, l'Afrique du Sud, l'Argentine, la Turquie, la Russie et l'Ukraine. En effet, la faible densité automobile de ces pays est la seule variable permettant d'espérer une augmentation des ventes. Cela implique que les constructeurs continueront à réorienter tout ou partie de leur production vers les marchés étrangers, et à développer des véhicules afin de s'y implanter.

L'autre tendance démographique forte est l'urbanisation croissante, notamment dans les pays émergents : d'ici 2020, respectivement 78 % et 55 % de la population des pays développés et en développement devrait habiter en ville. Une urbanisation continue à l'échelle mondiale a des impacts importants sur la congestion et la demande de mobilité des citadins. En effet, si elle tire la demande de transports en commun, cette tendance se traduit également par une poussée de la périurbanisation, facteur de développement important de la mobilité individuelle, faute d'une offre de transport collectif adaptée à une densité moyenne de l'habitat.



Démographie et urbanisation : prospective mondiale



Source : 2009 Revision of World Urbanization Prospects, United Nations Department of Economic and Social Affairs

Cette périurbanisation est également marquée par une séparation géographique forte des centres économiques et des lieux de résidence. Une conséquence

[1] 34 voitures pour 1 000 habitants en Chine, 14 en Inde, 133 au Brésil, contre 598 en France et 818 aux États-Unis.

directe de cette tendance est la nette prédominance des trajets relativement courts.

Les nouvelles motorisations électriques seront-elles des produits que les constructeurs développeront dans les pays émergents, où le pouvoir d'achat demeure plus faible ? Leur intérêt environnemental repose, le plus souvent, sur des préoccupations de politique locale, en raison d'une volonté politique de s'émanciper des importations de pétrole. En témoigne l'essor des véhicules fonctionnant au « flex fuel » au Brésil : en six ans, depuis leur introduction en 2003, ils sont passés de 3,5 % à 91,5 % des ventes¹. Quoi qu'il en soit, la plupart des consommateurs, notamment les primo-acheteurs, au nord comme au sud, auront en tête le prix d'achat avant le coût global lors de leur choix de véhicule, ainsi que la disponibilité d'un carburant tel l'éthanol à bas coût.

Une étude du cabinet Ernst & Young² souligne qu'une demande peut se concrétiser dans les pays émergents : la Chine envisage ainsi d'effectuer un bond technologique en passant directement de l'absence de véhicule au véhicule électrique. Dans ce pays, 60 % des personnes interrogées se disent intéressées par l'achat d'un véhicule électrique ou d'un hybride rechargeable, soit cinq fois plus qu'en Europe, aux États-Unis (13 %) ou au Japon (8 %)³. Notons que les types de VE qui commencent à être construits en Chine ne correspondent pas tout à fait au standard occidental.

1.3. La transformation des comportements des consommateurs est contrastée

Après cinquante ans de « massification » de la voiture, on observe une organisation de nos modes de vie et de nos territoires autour de la voiture, ce que John Urry qualifie d'« auto-système »⁴. On imagine donc difficilement comment sortir de cette « coercition à la flexibilité », où chacun doit être libre de se déplacer malgré l'organisation « auto-centrée » du territoire. Cette dépendance automobile est flagrante, notamment dans les territoires ruraux

[1] Chiffres provenant de l'Association nationale des constructeurs automobiles - ANFAVEA.

[2] Ernst & Young (2010), *Gauging Interest for Plug-in Hybrid and Electric Vehicles in Select Markets, Compared Results*, Ernst & Young Global Automotive Center.

[3] Consommateurs répondant à la question : « Seriez-vous intéressé par l'achat d'un VE ou d'un VHR ? ». Sont considérés ici comme « intéressés » ceux qui ont répondu « absolument » ou « très, dès qu'ils seront disponibles », et non les répondants « peut-être, lorsque le marché sera installé ». La question du prix n'est malheureusement pas évoquée.

[4] Urry J. (2004), « The "system" of automobility », *Theory, Culture & Society*, vol. 21.

et faiblement urbanisés, où trois déplacements sur quatre s'effectuent en voiture¹.

Mais parallèlement à ce constat qui laisse entrevoir une évolution très lente des comportements de mobilité, deux évolutions transforment les consommateurs : le désintérêt pour l'automobile en tant que marqueur social et l'intérêt environnemental croissant. La crise économique a rendu les consommateurs des pays développés plus exigeants sur le rapport qualité/prix des biens qu'ils achètent. Une attention plus vive à l'achat « environnemental » se fait jour, sans qu'il soit toutefois possible de mesurer de façon précise la propension à payer du consommateur.

L'évolution des comportements en matière de mobilité, même si elle demeure lente et progressive, est plus visible à l'intérieur des villes, où l'offre de transports est diversifiée. On constate un véritable découplage des évolutions : de 1994 à 2008, dans les grandes agglomérations, on observe une légère diminution de l'usage de la voiture, remplacée par la marche à pied, les transports collectifs ou le vélo ; alors que la voiture gagne du terrain dans les ensembles ruraux et faiblement urbanisés (76 % des déplacements, contre 55 % dans les pôles urbains)². La congestion des centres-villes et l'augmentation des prix immobiliers incitent les usagers à recourir de plus en plus à des transports multimodaux. L'augmentation de l'offre de transports en commun ainsi que l'apparition de nouvelles formes de mobilité (autopartage, covoiturage, vélo en libre-service) ont permis au citoyen de combiner plusieurs modes de déplacement pour un trajet donné. Les exigences environnementales poussent le marché à faire émerger de nouveaux moyens de transport adaptés ou innovants, comme le montre la création de petits véhicules urbains tels que la Smart, et bientôt la Twizy de Renault (2012). En effet, une grande majorité des déplacements est effectuée par des particuliers seuls, sur de petites distances comprises entre 3 et 60 km. C'est ce public urbain, généralement plus enclin à payer un surcoût et intéressé par les nouveautés, que les constructeurs cherchent à cibler.

Ce constat de relative stabilité des comportements est cependant inquiétant pour l'impact environnemental du parc automobile : il faudra en moyenne 15 à 20 ans pour renouveler entièrement le parc français. À l'horizon 2020, l'inertie

[1] Hubert J.-P. (2009), « Dans les grandes agglomérations la mobilité quotidienne des habitants diminue, et elle augmente ailleurs », *Insee Première*, n° 1252, juillet.

[2] Hubert J.-P. (2009), *op. cit.*

de ce parc (2 millions de véhicules neufs vendus par an, sur plus de 30 millions de véhicules légers) ne permet d'envisager qu'une pénétration lente du marché français par les VE. Même dans l'hypothèse optimiste où les VE, VHR et VH représenteraient 10 % des ventes de véhicules en 2020, leur proportion resterait longtemps faible sur l'ensemble du parc roulant. La diffusion des nouvelles motorisations sera elle aussi progressive et probablement concentrée dans les zones urbaines. Les volumes représenteront dans un premier temps un faible pourcentage du marché total de l'automobile : PSA Peugeot Citroën espère vendre 11 000 VE en Europe d'ici la fin 2011 et 100 000 unités au total d'ici à 2015. Renault estime que 2 millions de VE seront commercialisés en France en 2020 et qu'ils correspondront à 10 % des ventes mondiales. La Commission européenne est plus mesurée : elle prévoit 1 % à 2 % des ventes en Europe en 2020. Aussi, l'évolution technologique des véhicules « au fil de l'eau » ne permettra pas de changement systémique avant plusieurs dizaines d'années si l'on tient compte des rythmes de diffusion à travers une dynamique flux/stock. C'est pourquoi les pouvoirs publics souhaitent susciter une véritable transformation des comportements de mobilité, parallèlement à l'incitation à la dépollution des véhicules neufs.

Les évolutions démographiques et d'urbanisation seront également favorables au développement de véhicules urbains à faibles nuisances (bruit, odeurs, émissions polluantes). Les préoccupations des individus sur l'impact environnemental de leur consommation ne cessent d'augmenter et leur demande de sécurité demeure importante et stable¹. La proportion des éco-consommateurs/alter-consommateurs, qui ont une certaine tendance à payer pour des produits moins carbonés, augmente, même s'il est très difficile d'appréhender quantitativement cette évolution. Plusieurs études mettent en valeur la sensibilité accrue des consommateurs à la protection de l'environnement comme facteur d'achat : ils sont 31 % en Europe de l'Ouest à citer la protection environnementale comme raison de posséder un véhicule économique ou propre². Toutefois, ils sont 46 % à demeurer d'abord attachés aux économies de carburants.

Les VH ont ouvert la voie à une meilleure acceptation des nouvelles motorisations. Néanmoins, leur coût à l'achat (la Civic Hybrid et la Toyota Prius sont proposées à partir de 25 000 euros en France), leur coût d'entretien et une consommation

[1] Ernst & Young [2010], *op. cit.*

[2] Cap Gemini [2010], *Cars Online 09/10, Understanding Consumer Buying Behavior in a Volatile Market*, octobre.

équivalente à une voiture diesel ont engendré un développement lent du marché. Ces appréhensions liées au surcoût de tels véhicules pourraient se retrouver dans le modèle du marché électrique. Mais en août 2009 Toyota avait écoulé 2 millions de voitures hybrides depuis sa création en 1997, dont un million entre 2007 et 2009, et la troisième génération de Prius, qui consomme moins de 4 litres aux 100 km, est actuellement la voiture la plus vendue au Japon. Et la croissance est en marche, avec deux évolutions qui soutiennent ce développement : le lancement par Honda de voitures hybrides à moindre coût (la Honda Insight sera vendue moins de 20 000 euros en Europe), et le nouveau bond technologique imminent (et très attendu) de PSA avec l'hybride diesel sur sa gamme haute 308 et C4.

Ces tendances lourdes pèsent fortement sur le comportement des consommateurs : l'évolution sera lente mais un changement se dessine dans la consommation de mobilité, qui se détourne de l'automobile-plaisir pour tous et s'oriente vers différents véhicules selon les usages des consommateurs. Le luxe de demain résidera moins dans une berline que dans une voiture à la conception et au design soigné, à forte valeur ajoutée technologique et peu polluante. Bien que le contexte socioéconomique puisse induire à court terme des transformations tendancielles de la demande et des usages de l'automobile, la persistance des aspirations à la mobilité individuelle laisse penser que la voiture particulière subsistera encore un temps, mais qu'elle relèvera d'un usage parmi d'autres au sein d'un système multimodal. Quoi qu'il en soit, le changement ne se fera qu'en fonction de trois impératifs : le signal-prix, la commodité et la désirabilité.

2 ■ Les contraintes qui risquent de peser sur les consommateurs

L'avenir de la voiture électrique ne dépendra pas uniquement de la capacité de l'industrie automobile à proposer une offre compétitive et des batteries assurant une autonomie suffisante. D'une part, le VE et le VHR s'adressent à un segment bien défini du marché : principalement les navetteurs et les citadins¹. Leur coût plus élevé qu'un véhicule thermique impose, d'autre part, de développer un concept commercial innovant permettant la prise en charge partielle de l'achat ou de la location de la batterie (leasing, stations d'échange de batteries, véhicule en libre-service, flotte d'entreprise). Enfin, l'avenir du véhicule

[1] Hodson N et Newman J. (2009), « A new segmentation for electric vehicles », *McKinsey Quarterly*, novembre.

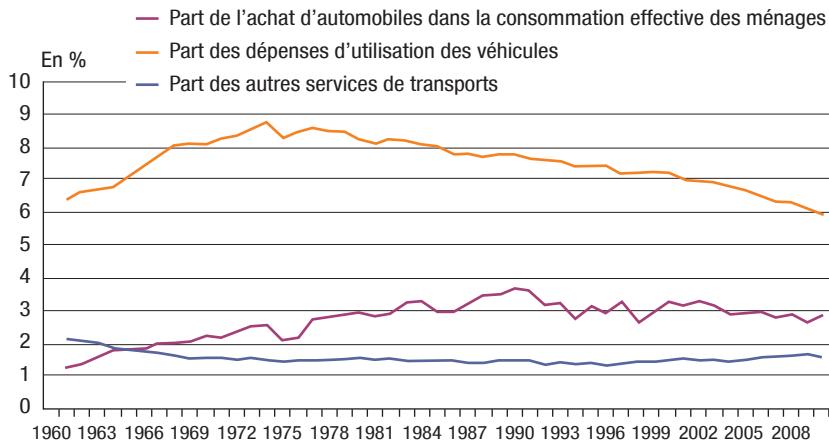
électrique est tributaire de la capacité des partenaires publics et privés à créer un environnement favorable en équipant le maximum de parkings et de logements avec des prises de courant adaptées, selon des modèles économiques encore non fixés.

2.1. Le prix demeure le principal facteur d'achat

Le signal-prix demeure primordial dans les choix de la plupart des usagers. L'augmentation des dépenses contraintes¹ a renforcé la perception de l'effort que représente la possession automobile : avec plus de 6 400 euros de dépenses par an en moyenne, la voiture constitue l'essentiel du budget transport des ménages et absorbe un sixième de leurs dépenses courantes (le quart pour les ménages périurbains). Les consommateurs français sont également très sensibles au prix du carburant : on observe généralement une forte baisse de la demande en cas de hausse du prix du carburant qui se traduit automatiquement par une diminution (réelle ou ressentie) du nombre de kilomètres parcourus et, à l'inverse, un plus grand nombre de kilomètres parcourus en cas de baisse très faible du prix du carburant².



Part de l'automobile et de ses usages dans la consommation effective des ménages depuis 1960



Source : INSEE, *comptes nationaux*, calculs CAS

[1] Centre d'analyse stratégique (2009), *Sortie de crise : vers l'émergence de nouveaux modèles de croissance ?*, rapport du groupe de travail présidé par Daniel Cohen, Paris, La Documentation française.

[2] Confirmé notamment par l'enquête Ifop (2010), « Impact du prix du carburant sur l'usage de la voiture », Vague 2, janvier.

Le différentiel de prix existant entre les véhicules thermiques et les nouvelles motorisations devra se réduire considérablement si les constructeurs souhaitent faire des nouveaux modèles VE ou VHR des véhicules de masse, notamment si l'économie réalisée sur le plein d'essence ne compense pas les surcoûts liés à l'achat. En effet, les consommateurs ne sont pas prêts à assumer le surcoût d'un véhicule moins ou non consommateur d'essence et ils cherchent avant tout à effectuer des économies d'énergie s'ils achètent un véhicule « vert ». Les consommateurs peuvent toutefois espérer faire quelques économies sur le prix de leur assurance (en raison de la baisse du nombre d'accidents) et sur des dépenses d'entretien inférieures à celles d'un véhicule classique, un moteur électrique exigeant moins d'interventions. Chère pour le consommateur, cette nouvelle technologie sera également coûteuse pour les États, qui mettent en place de nombreuses incitations à l'électrification des véhicules.

L'impératif pour permettre le développement rapide des VE et VHR est de faire de ce type de véhicules un choix économiquement neutre pour l'utilisateur final. C'est ce que vise Renault, qui cherche à avancer des prix concurrentiels grâce à une production en grande série. Renault souhaite proposer un véhicule électrique sans batterie au même prix que son équivalent diesel et louer la batterie de sorte que le loyer plus la dépense en électricité soit comparable aux dépenses de carburant d'une voiture thermique. Peugeot a avancé une stratégie de location pour ses modèles électriques. Le modèle économique dépend de plusieurs critères importants : les économies d'échelle, le consentement à payer des consommateurs et le développement des infrastructures de recharge. Les économies d'échelle seront impératives mais, même si les technologies électriques s'améliorent, il faudra, durant la première phase de développement, que les consommateurs composent avec des véhicules plus coûteux, aux contraintes plus fortes (faible portée, espace réduit). La France dispose toutefois d'atouts avec un environnement favorable, en combinant un bas coût de l'électricité et une force incitation fiscale étatique.

2.2. Les contraintes propres aux nouvelles motorisations façonneront leur utilisation

Deux principales contraintes handicapent les VE par rapport au VTh ou au VH : une autonomie nécessairement inférieure et l'obligation de les recharger pendant plusieurs heures, plusieurs fois par semaine, voire tous les jours. La question des infrastructures de charge, à la fois publiques et privées, est également primordiale et encore non résolue, même dans le principe. Qui

devra s'acquitter de cette partie indispensable à la démocratisation des VE : les consommateurs, les pouvoirs publics, les constructeurs ou un prestataire de service ? Le consommateur risque de refuser de prendre en charge les coûts cachés nécessaires à la recharge : parking contraint par la présence de bornes de recharge, impossibilité de recharge lors des transits, renforcement et mise aux normes de son installation électrique personnelle, voire installation d'un boîtier de recharge particulier comme l'envisage Renault.

Toutefois, la dissémination de bornes de recharge sera importante pour les conducteurs de VE, notamment les consommateurs français, qui sont ceux qui craignent le plus la faible autonomie des véhicules : ils sont fortement sujets à la « *range anxiety* », à l'inquiétude de tomber en panne sèche avec un VE¹. La recharge sur la voirie publique sera nécessairement limitée et sanctionnée par un coût élevé, mais elle permettra de rassurer les utilisateurs et d'effectuer des recharges exceptionnelles.

L'autonomie inférieure des VE les place dans une position difficile face à leur équivalent thermique. Aucune comparaison n'est possible entre les 100 à 150 km d'autonomie théorique d'un VE, en pratique plus proches de 60 à 80 km, et les 600 à 1 000 km d'un véhicule thermique. Cette autonomie limitée, qui demeurera, malgré une amélioration probable, nécessairement inférieure à celle d'un véhicule thermique, place le VE en situation de second véhicule à utilisation urbaine ou suburbaine ou encore en tant que flotte captive ou véhicule partagé (d'entreprise ou de location), ce qui n'est guère favorable à une montée en régime rapide des ventes.

Les flottes d'entreprise semblent un moyen de permettre le développement du marché. Les entreprises sont en effet le lieu adéquat pour s'adapter aux contraintes des VE : elles privilégient le coût total d'utilisation, les trajets sont souvent courts et prévisibles, la centralisation des véhicules sur un parking facilitera la recharge. Enfin, de nombreuses compagnies utiliseront des véhicules à moindre impact environnemental afin de soigner leur image d'entreprise citoyenne ou dans le cadre de leur politique de Responsabilité sociale des entreprises.

Les flottes d'entreprise représentent une part importante du marché automobile, notamment de véhicules neufs. Aux États-Unis, où les véhicules d'entreprise sont au nombre de 16 millions, General Electric a annoncé qu'il

[1] L'enquête d'Ernst & Young (2010), *op. cit.*, rapporte qu'ils sont 81 % à considérer ce frein comme le principal facteur de non-achat d'un véhicule électrique ou hybride rechargeable.

prévoyait d'acquérir 25 000 VHR pour sa flotte, devenant au-delà de 2011 le premier propriétaire de VHR au monde (90 % de sa flotte). Cette commande sera un test majeur de l'intérêt économique d'une flotte électrique. Elle permettra le développement de l'industrie automobile américaine, puisque la société envisage de s'équiper en Chevrolet Volt, et sera également un moyen de promouvoir leur système de recharge électrique WattStation. En France, 50 000 VE ont été pré-commandés en avril 2010 par un consortium d'entreprises publiques et privées¹ afin de lancer le marché (engagement minimal de 23 000 VE).

En réalité, les VE sont capables d'assurer la majorité des déplacements des automobilistes, mais cette donnée ne prend pas en compte l'aversion naturelle des consommateurs pour le risque. Dans les faits, peu d'automobilistes sont prêts à abandonner la voiture polyvalente, même en deuxième voiture, pour un véhicule mono-usage. De plus, le cumul de nombreux petits trajets ne sera pas nécessairement équivalent à plusieurs longs trajets, signifiant que l'investissement dans un VE ne sera pas forcément rentable.

En définitive, ces évolutions laissent à penser que le moment où la voiture électrique prendra une part majeure du marché global demeure lointain, elles porteront surtout sur des solutions urbaines ou au sein de flottes d'entreprise. Un plus large essor du VE dépendra des progrès réalisés sur les batteries : d'ici là, les améliorations portant sur les solutions classiques occuperont donc une place importante, y compris le marché grandissant de l'automobile partagée et/ou *low cost*.

3 ■ Comment sortir de la consommation de niche ?

3.1. Une ouverture à la prestation de services ?

Une des réflexions les plus abouties sur la commercialisation du VE suggère de miser sur ses particularités et contraintes, c'est-à-dire en promouvant son utilisation en tant que service de mobilité, avec une intégration forte du service automobile en lieu et place de la voiture-objet. Hormis le prix d'acquisition, le principal point faible du VE est son autonomie : cette difficulté pourrait être surmontée par la commercialisation d'un service de mobilité dans les grandes zones urbaines, à l'image des vélos en libre-service. Complémentaire aux transports en commun, l'offre de location

[1] ADP, Air France, Areva, Bouygues, EDF, ERDF, Eiffage, France Télécom, GDF-Suez, Suez Environnement, GRT Gaz, GRDF, La Poste, la RATP, la SAUR, la SNCF, SPIE, l'UGAP, Vinci et Veolia.

de véhicules en libre-service s'est en effet développée dans les grandes agglomérations françaises depuis ses prémices à Rennes en 1998. Fin 2008, on comptait 32 000 vélos et 2 500 stations en France, pour 120 millions de kilomètres parcourus en Vélib', Vélo'v, V'hello et autres Vélo+, chiffres qui devraient encore augmenter. Malgré un coût important, le bilan est considéré comme favorable si l'on prend en compte les bénéfices globaux (décongestion, pollution, valeur d'exemple, etc.).¹ À l'image de cette initiative, les VE pourraient donc être utilisés en tant que service de mobilité pour les professionnels ou les particuliers : pour des flottes d'entreprise, qui comportent de nombreux véhicules parcourant de courtes distances ; en tant que service à la demande (autopartage) dans les aires urbaines ; ou encore pour les services de marchandises ou de coursier sur courtes distances.

Les expériences françaises (Liselec à La Rochelle et Praxitèle à Saint-Quentin en Yvelines²) servent d'étalon pour des lancements plus importants, comme celui de l'Autolib' à Paris, programmé pour octobre, puis décembre 2011. Le seul développement en cours de ce type de services de mobilité est le projet de Renault Nissan en Israël qui débutera en 2011³, et qui cible principalement les flottes d'entreprise. Le projet propose une véritable « expérience de mobilité » en disposant dès son lancement de nombreuses bornes de recharge (500 000 dans tout le pays) ainsi que de 200 stations d'échange rapide de batteries, pour autoriser de plus longs trajets (système « Quickdrop »). Ce projet constitue une avancée importante pour le « business model » des véhicules électriques, en évitant au maximum les recharges rapides.

Les constructeurs ont bien senti qu'ils devaient dès à présent se positionner sur ce marché de l'intermodalité. Renault a ouvert un site Internet sur la « mobilité durable »⁴, centre de ressources sur la mobilité « zéro émission ». PSA vient de lancer à Paris, Berlin et Amsterdam un service d'intermodalité – « Mu by Peugeot » – qui propose aux clients différents modes de déplacement (voitures, scooters, vélos) pour la durée de leur choix, à partir d'un « compte

[1] Commissariat général au développement durable [2010], « Les coûts et les avantages des vélos en libre-service », *Économie et Évaluation*, n° 50, mai.

[2] Mangeas M., Blosseville J.-M. et Massot M.-H. [2000], « Praxitèle, un concept, un service, une expérimentation : bilan d'un prototype », *TÉC*, n° 161, octobre, p. 17-25.

[3] Voir notamment Centre d'analyse stratégique [2009], « Le choix du véhicule électrique en Israël », *La Note de veille*, n° 132, avril.

[4] www.mobilité-durable.org.

mobilité » rechargeable¹. D'autres acteurs sont sur les rails de cette nouvelle économie de la fonctionnalité² : le fonds d'investissement « Eco-mobilité partenaires »³ s'est porté candidat sur l'Autolib' parisien, et investit notamment dans Green Cove, société de covoiturage pour les collectivités, les entreprises et les particuliers. Repenser l'automobile impliquera des dialogues à inventer entre constructeurs historiques et nouveaux opérateurs de mobilité. Cette mutation de l'objet-automobile en service-automobile à la demande supposera probablement des partages de création de valeur entre les différents opérateurs de nouvelles solutions.

3.2. Une ouverture à la demande de deux-roues électriques ?

Concernant les deux-roues électriques, le marché semble s'ouvrir à ce nouveau type de modèles. Face à la congestion des grandes agglomérations et aux difficultés de stationnement, nombreux étaient les automobilistes qui avaient déjà investi dans un deux-roues, ou utilisaient de façon plus prononcée le vélo. Cependant, ils étaient encore rares, jusqu'à présent, à faire l'achat d'un scooter électrique ou d'un vélo à assistance au pédalage. Le choix demeurait restreint, les performances étaient trop limitées et les coûts trop élevés pour envisager un investissement rentable. Mais le marché a gagné en maturité, et les deux-roues électriques présentent aujourd'hui un véritable progrès par rapport à la génération précédente. Les scooters et cyclomoteurs disponibles peuvent rouler en moyenne 70 km avant d'être rechargés, distance qui ne cesse d'augmenter⁴. Ils bénéficient en outre d'une prime d'assurance modérée, avantage auquel s'ajoute une prime de la Ville de Paris de 400 euros, qui sera bientôt généralisée à toute la France. Le nombre de bornes de recharge devrait également augmenter (Paris dispose pour l'instant de cent points de recharge et de trois cents prises).

Les gains sont spectaculaires en matière de pollution sonore : alors que les deux-roues motorisés sont parmi les véhicules les plus bruyants, les cyclomoteurs électriques sont quasi silencieux. De la même manière, leurs émissions de polluants et de GES sont quasiment nulles, alors que le parc immatriculé comporte de très nombreux deux-roues particulièrement polluants comme les

[1] www.mu.peugeot.fr.

[2] Concept qui consiste à faire payer le consommateur pour l'accès à un service plutôt que l'achat d'un bien, il a notamment été mis en avant au sein du Grenelle de l'environnement.

[3] Groupe incluant SNCF, RATP, Avis et Vinci Park.

[4] Le prochain modèle de scooter électrique de Peugeot, E-Vivacity, pourra parcourir 80 à 100 km avec un chargement qui ne durera que 4 heures. Il est annoncé pour 2011.

petits scooters (50 à 100 cm³) à moteur deux-temps. Enfin, le vélo électrique constitue une amélioration qui permettra d'élargir la base des utilisateurs sans nécessiter d'infrastructures supplémentaires, car la recharge devra s'effectuer à domicile. Il y aurait donc un intérêt important en matière de pollution sonore et atmosphérique à accélérer la substitution du trafic. Il reste une forte marge de progression afin de stimuler ce marché émergent : en 2008, il s'est vendu 15 700 vélos à assistance électrique en France contre près de 100 000 en Allemagne et, surtout, quelque 20 millions en Chine.

3.3. Cibler le consommateur potentiel

L'avenir des nouvelles motorisations ne dépendra pas uniquement de la demande, qui demeure très sensible au coût (cf. le succès de la prime à la casse et du bonus/malus écologique). L'orientation des politiques publiques, qu'elles stimulent l'offre ou directement la demande, aura également un impact sur la tarification des nouvelles technologies électriques. De la même manière, une régulation et un encadrement plus fort de la politique de transport (péages urbains, fiscalité sur le carburant, offre de transports en communs, etc.) transformeraient le coût de l'usage des véhicules et, *in fine*, influeraient sur les choix des agents. Une dernière évolution qui jouera sur les comportements des consommateurs est celle de la technologie : non seulement la technologie des véhicules électriques et hybrides évoquée dans ce rapport mais aussi la technologie embarquée. L'interaction des technologies de l'information avec l'offre de mobilité devrait se faire rapidement, et permettre une facilitation parallèle de l'offre de services de mobilité. Elle rendra la multimodalité plus aisée et plus attractive.

Il faut souligner que le véhicule électrique ne sera pas comme le véhicule thermique une voiture multi-fonctionnelle pouvant avoir plusieurs usages de mobilité : il restera principalement un véhicule urbain et suburbain ou un deuxième véhicule. Les possibilités d'optimisation de l'architecture d'ensemble sont considérables : certains VE ne sont encore que l'adaptation de modèles thermiques. Les modèles qui seront proposés prochainement reposent sur une carrosserie finalement peu différente de celle des véhicules thermiques. Une segmentation plus fine sera nécessaire, afin que les consommateurs potentiels ne soient pas obligés d'acquérir des véhicules supérieurs à leurs besoins. Leurs attentes seront bien spécifiques, et les constructeurs devront sortir des schémas antérieurs. Les évolutions de l'offre de deux-roues, voire de véhicules alternatifs (trois roues type « tuk-tuk » ou quatre roues pour deux

passagers) doivent également être prises en compte si le coût d'utilisation des véhicules thermiques venait à augmenter. Finalement, le VE pourrait devenir un croisement entre une voiture et un deux-roues électriques, comme le montre la Twizy de Renault ou le projet chinois de développer un petit véhicule électrique de type quadricycle, « spartiate » dans sa conception mais offrant un confort amélioré par rapport à un scooter.

Le VE semble bien adapté à des flottes d'entreprise (tournée diurne, recharge nocturne). Le lancement du premier appel d'offres français est en cours entre l'Ugap, la centrale d'achat public, et une vingtaine de constructeurs automobiles. La commande consiste en l'achat de 23 000 véhicules électriques (engagement minimal) sur quatre ans (2011-2015) pour le compte d'une vingtaine d'entreprises publiques ou privées (La Poste, RATP et SNCF, Aéroports de Paris, Air France, Bouygues, Veolia, Areva, etc.).

Selon les enseignements du Groupe BMW suite à la mise sur le marché de plusieurs dizaines de Mini E à Berlin¹ – 450 et 40 Mini E sont respectivement en phase de test aux États-Unis et à Londres –, le client potentiel est masculin, généralement âgé d'une trentaine d'années, disposant de revenus et d'une éducation supérieurs à la moyenne, intéressé par la technologie et utilisant la Mini E comme seconde voiture, pour les trajets urbains quotidiens (et 56 % des utilisateurs n'ont jamais utilisé de borne de charge publique). Le Groupe BMW a annoncé qu'il allait tester 50 Mini E dans Paris et sa proche banlieue, en partenariat avec EDF, Veolia Environnement et l'INRETS.

La classification des consommateurs, que l'on retrouve chez les constructeurs comme dans les cabinets de conseil, peut se présenter ainsi, par ordre d'importance :

- les clients professionnels (taxis, collectivités, flottes d'entreprise, poste, services de livraison) ;
- les particuliers, parmi lesquels on peut distinguer :
 - les « *commuters* » : cible principale et importante en nombre, ils habitent en zone périurbaine, disposent déjà d'une voiture thermique et utiliseront un VE pour se rendre au travail, ou lors de loisirs de proximité ;
 - les « *early adopters* » : cible plus restreinte mais probablement les premiers acheteurs qui pourraient lancer le marché. Jeunes professionnels issus

[1] BMW Group (2010), « E-Mobilité, Enseignements tirés de l'essai sur le terrain effectué avec la Mini E », Présentation PowerPoint.

d'études supérieures, urbains, aisés, aimant la technologie et très au fait des enjeux du développement durable, ils souhaitent se distinguer dans leur comportement et sont disposés à payer cette exclusivité. Ils seraient à même de préférer le leasing ou le véhicule en libre-service à l'achat ;

- les « locaux-écolos » : cible restreinte, mais également parmi les premiers acheteurs. Il s'agit d'écologistes convaincus, qui se déplacent déjà peu par souci environnemental et utiliseraient un VE ou un VHR au sein d'un ensemble multimodal ou ponctuellement. Ils pourraient privilégier dans un premier temps les quadricycles ou les deux-roues électriques ;
- les flottes de véhicules de partage.

La communication auprès du grand public sera fondamentale, ainsi que les premiers retours des utilisateurs. Les VE ne se vendront pas comme des véhicules thermiques, et devront s'insérer dans un écosystème qui prenne mieux en charge la relation-client et le service après-vente. L'encadrement des premiers clients sera fondamental et les constructeurs se devront de prodiguer des conseils adéquats (lieux de recharge, lavage du véhicule, questions de sécurité, etc.) et de rester en contact avec les acheteurs pour assurer le recyclage de la batterie et/ou aider à l'éventuelle revente du véhicule.

Cette transformation de la motorisation pourrait également influer sur le comportement des utilisateurs, chaque type de véhicules correspondant à une utilisation bien particulière, adaptée au type de zone urbaine dans laquelle s'effectue le déplacement. Cela signifiera un changement du rapport à l'automobile, impliquant une part plus importante de services au sein de la branche. Cette « servicisation » aura pour facteurs une nouvelle manière de pratiquer la vente et la distribution (notamment *via* Internet), un accroissement de la location temporaire (du type AutoLib', Zipcar), probablement une limitation de la circulation, et une augmentation de l'entretien des véhicules liée au vieillissement du parc.

De nombreuses innovations non techniques seront nécessaires pour développer de nouveaux modes de commercialisation et de distribution, qui ne se trouveront pas nécessairement dans le cœur de métier des constructeurs automobiles. Cela supposera l'entrée de nouveaux acteurs, comme Google, Virgin, ou des partenariats entre entreprises relativement différentes, comme Renault/NEC/Continental pour les réseaux de Better Place ou le consortium Vinci/Avis/SNCF/RATP, candidat malheureux pour l'Autolib'.

La demande de véhicules à nouvelle motorisation concerne essentiellement une niche de navetteurs urbains qui souhaitent changer leur rapport à la mobilité

Le démarrage de l'électrique risque toutefois de ressembler moins à une révolution qu'à une lente évolution. Le fort investissement étatique tente de contrer les deux tendances lourdes de long terme chez les consommateurs qui laminent le renouvellement du parc automobile : l'érosion du consentement à payer des consommateurs français (essor de l'achat d'occasion, vieillissement du parc, descente en gamme et attrait du véhicule *low cost*) et l'impératif écologique. Au mieux, dans les dix ans qui viennent, cette nouvelle forme de motorisation représentera 10 % à 15 % de la demande mondiale, autrement dit une niche mais pas nécessairement une rupture. L'horizon de la voiture électrique demeure lointain et résolument urbain. La cohabitation de plusieurs motorisations semble inévitable à moyen terme, fortement influencée par les décisions des pouvoirs publics et par les réglementations en vigueur.

Pour évaluer l'avenir des VE, de nombreuses inconnues subsistent sur leur écosystème (prix du pétrole, volonté des consommateurs, incitations étatiques, etc.) mais aussi sur l'évolution technologique et l'essaimage possible. Afin de franchir le cap du marché de niches et séduire en masse les particuliers, les nouvelles motorisations, qu'elles soient hybrides, hybrides rechargeables, ou tout-électriques, devront faire preuve de leurs avantages comparatifs respectifs, que ce soit en matière de tendance, de commodité au sein d'un environnement urbain, de performance, de prix, de nouveau service, etc., faute de quoi leur essor risque d'être compromis.



Annexes

Annexe 1

Les batteries au lithium

Cette annexe rappelle les principes de fonctionnement des batteries et présente l'évolution des technologies utilisant le lithium.

1 ■ Le fonctionnement des batteries

1.1. Le principe de base d'un générateur électrochimique

Le fonctionnement d'un générateur électrochimique repose sur le stockage de l'énergie sous une forme chimique, puis sur sa libération, lors de la décharge, sous forme de courant électrique au cours de réactions électrochimiques dites d'oxydo-réaction. Lorsque ces réactions ne sont pas réversibles, on parle de pile. Lorsqu'elles le sont et que l'on peut recharger le système en faisant passer un courant électrique en sens inverse, on emploie le terme d'accumulateur¹.

La réaction chimique se produit entre deux électrodes grâce au passage d'ions au sein d'un électrolyte (milieu « conducteur ») le plus souvent liquide. Pour compenser ce déplacement de charges ioniques, des électrons circulent dans le circuit extérieur, créant un courant électrique capable de faire fonctionner un appareil connecté à l'accumulateur (moteur, lampe, ordinateur, etc.).

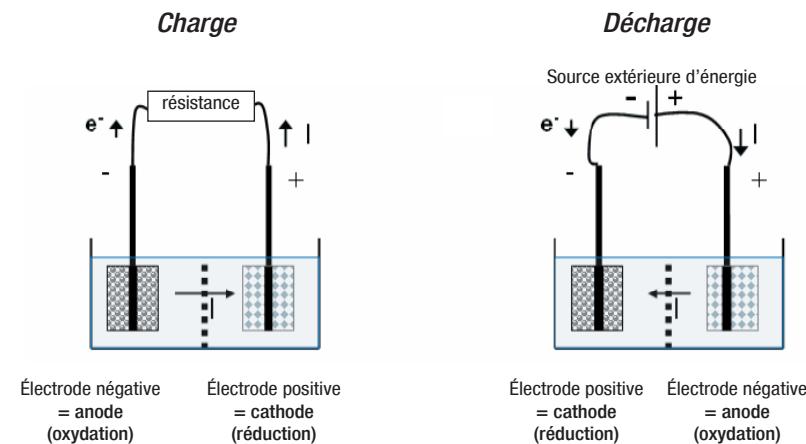
De manière plus précise, la réaction chimique se décompose en deux demi-réactions lors de la décharge : la première, à l'anode, correspond à une oxydation et libère des électrons. C'est le pôle négatif de la pile. Au contraire, la réaction de réduction à la cathode, pôle positif de la pile, consomme des électrons et des ions positifs. Ces rôles s'inversent lors de la phase de recharge d'un accumulateur. L'élément qui perd un électron est le réducteur, celui qui en gagne est l'oxydant : un accumulateur peut ainsi être considéré comme

[1] La langue anglaise ne distingue pas les piles des accumulateurs et utilise le même mot de *battery* : une pile correspond à une *primary battery*, et un accumulateur à une *secondary battery*.

mettant en œuvre un échange d'électrons entre deux couples oxydo-réducteurs, autrement dit entre deux couples redox.

Ce principe de fonctionnement est le même quel que soit l'accumulateur utilisé.

💡 **Schéma de principe du fonctionnement d'un accumulateur générateur**



Source : IFP Énergies nouvelles, extrait de l'ouvrage Véhicules électriques hybrides, à paraître en 2011 aux éditions Technip

En toute rigueur, la cathode est le siège de la réduction. Dans un accumulateur qui débite (décharge), elle correspond donc à la borne positive (+). Lors de la recharge, la réaction de réduction se produit à la borne négative de l'accumulateur (-), qui devient alors la cathode. Néanmoins, par souci de simplification, nous désignerons par cathode l'électrode siège de la réduction lors de la décharge. Ce terme sera donc synonyme pour nous de borne positive de la batterie.

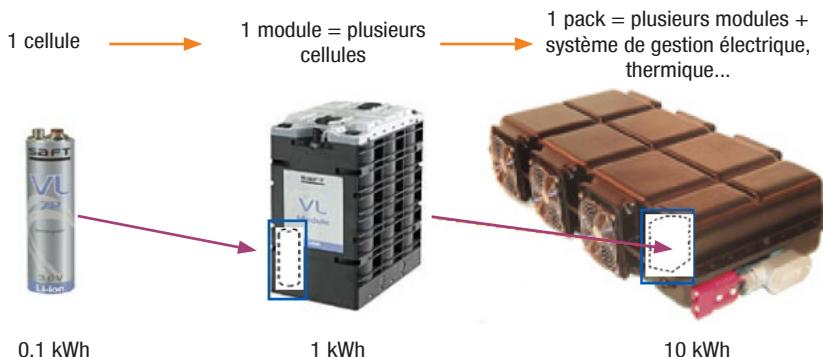
L'électrolyte séparant les deux électrodes a une grande importance. Il doit en effet permettre le déplacement des ions, mais interdire le passage des électrons. Il doit également « supporter » la tension qui lui est appliquée. Ainsi, lorsque la tension entre les électrodes devient supérieure à un certain seuil

(compris entre 1,23 et 2 volts selon le type de batteries¹), les molécules d'eau ont tendance à se décomposer, si bien que ce liquide n'est plus utilisable comme électrolyte.

1.2. L'architecture d'une batterie

Une batterie est un ensemble d'accumulateurs (également appelés cellules ou éléments), montés en série ou en parallèle, de façon à produire un courant électrique continu. Ceux-ci sont regroupés dans des modules, dont l'assemblage constitue la batterie.

Structure d'une batterie (pack)



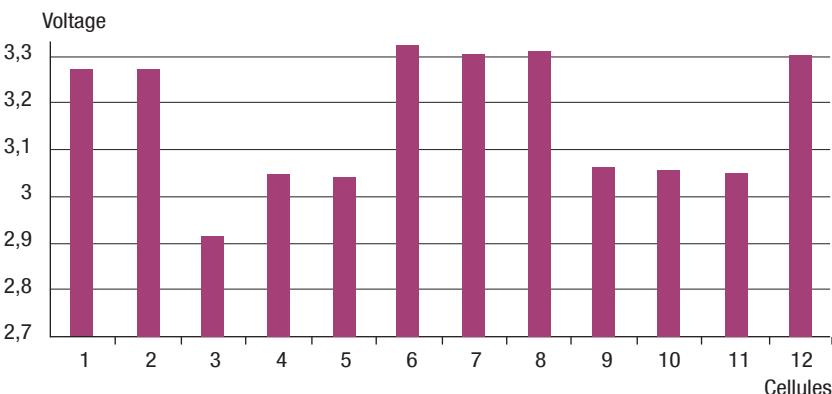
Source : EDF R & D, Laurent Torcheux ; la cellule et le module représentés ici sont de fabrication Saft

Dans certains cas, nickel-hydrure et lithium notamment, la batterie comprend également un système de gestion de l'énergie (« *Battery Management System* ») destiné à protéger les différents éléments contre des tensions ou des températures excessives. Il sert aussi à estimer l'état de charge et l'état de santé de la batterie et à répartir la charge de façon homogène entre les différents éléments (la décharge d'un élément pouvant conduire à limiter l'usage de la batterie dans son ensemble).

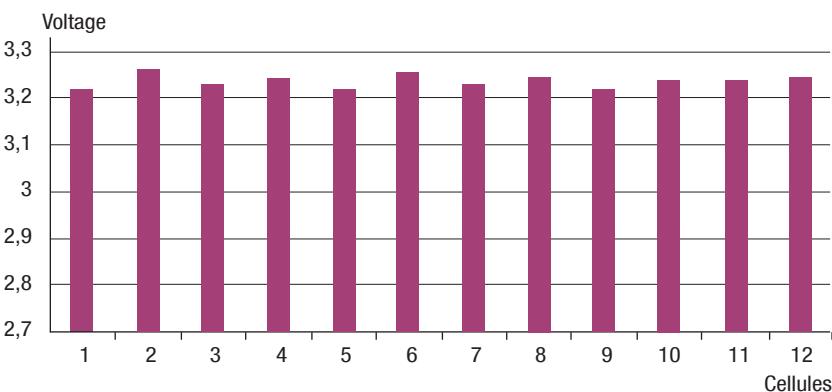
[1] Le seuil thermodynamique d'électrolyse de l'eau est de 1,23 volt : toutefois, dans les batteries au plomb, l'existence de « surtensions » sur les électrodes nécessaires aux décompositions de l'hydrogène et de l'oxygène conduit à un seuil voisin de 2 volts. Les surtensions sont, pour chacun des gaz H_2 et O_2 , l'écart entre le potentiel théorique de dégagement gazeux et celui auquel ce dernier devient appréciable.

Les deux figures suivantes, fournies par Renault¹, montrent la différence dans la distribution des tensions des douze cellules d'un module de batterie selon qu'il y a ou non un système performant d'équilibrage des cellules. La deuxième figure représente les tensions aux bornes des douze cellules lorsqu'on utilise un système de rééquilibrage (fonctionnant à moins de 46 mV).

♡ **Tension des douze cellules d'une batterie sans système de gestion (BMS)**



Tension des douze cellules d'une batterie avec système de gestion (BMS)



Source : Renault

[1] « Renault-Nissan Alliance perspective on batteries for fully electric vehicles », PowerPoint présenté en octobre 2010 à Cannes par Jérôme Perrin, direction de la Recherche, des études avancées et des matériaux, Renault.

La nature des matériaux et leur agencement sont les principaux déterminants des performances d'une batterie. Les performances et le prix dépendent également du circuit électrique reliant les différents éléments, de l'assemblage qui représente 20 % du coût complet et du séparateur qui doit permettre le déplacement des ions et interdire celui des électrons (également 20 % du coût total).

1.3. Les grandes caractéristiques d'un accumulateur

Plusieurs caractéristiques des batteries sont essentielles pour comprendre leur fonctionnement.

- **La tension aux bornes d'un accumulateur** : elle dépend directement des réactions chimiques en jeu sur les deux électrodes. De fait, le mouvement des charges électriques va dépendre de l'affinité à céder ou à attirer des électrons de chacun des deux couples oxydo-réducteurs présents à l'anode et à la cathode. À chacun d'entre eux peut être associé un potentiel d'oxydo-réduction caractéristique de cette affinité : la tension aux bornes de la pile résultera simplement (à courant nul) de la différence de ces deux potentiels et dépendra donc principalement des matériaux en jeu.

Le tableau suivant donne quelques exemples de potentiel standard : la tension aux bornes d'une batterie au plomb, qui (de manière simplifiée) repose sur les deux couples $\text{PbSO}_4/\text{PbO}_2$, Pb/PbSO_4 , sera de 2,10 volts. On cherchera donc à associer des couples conduisant à une tension particulièrement forte. Ce tableau permet de montrer l'intérêt qui s'attache au lithium, matériau particulièrement réducteur. Son association avec le fluor, qui reste malheureusement purement théorique, donnerait une tension de 5,89 volts.

Au-delà de ces considérations théoriques, la tension réelle aux bornes d'un générateur dépendra certes de la différence de potentiel entre les deux couples oxydo-réducteurs, mais aussi des réactions parasites qui peuvent se produire, de la résistance interne de la batterie, de son état de charge et de son vieillissement. De manière simplifiée, elle sera donc donnée par :

- la différence entre les potentiels des électrodes positive et négative, à courant nul,
- diminuée de la tension de polarisation des électrodes, qui résulte des réactions qui se produisent sur les électrodes,
- diminuée également de la chute de tension liée à sa résistance interne (qui dépend de celles de l'électrolyte, des matériaux conducteurs, des interfaces, etc.) suivant un terme proportionnel à l'intensité du courant ($U = RI$).

Exemples de potentiel standard

Oxydant	E° [V]	Réducteur
F_2	+ 2,87	F^-
S_2	+ 2,10	SO_4^{2-}
$S_2O_8^{2-}$	+ 2,01	SO_4^{2-}
PbO_2	+ 1,69	$PbSO_4$
MnO_4^-	+ 1,69	MnO_2
MnO_4^-	+ 1,51	Mn^2
Cu^{2+}	+ 0,34	Cu
SO_4^{2-}	+ 0,17	SO_2
H_3O^+	0,00	$H_2(g)$
Pb^{2+}	- 0,13	Pb
Sn^{2+}	- 0,13	Sn
Ni^{2+}	- 0,25	Ni
$PbSO_4$	- 0,36	Pb
Cd^{2+}	- 0,40	Cd
Fe^{2+}	- 0,44	Fe
Zn^{2+}	- 0,76	Zn
Al^{3+}	- 1,66	Al
Mg^{2+}	- 2,37	Mg
Na^+	- 2,71	Na
K^+	- 2,92	K
Li^+	- 3,02	Li

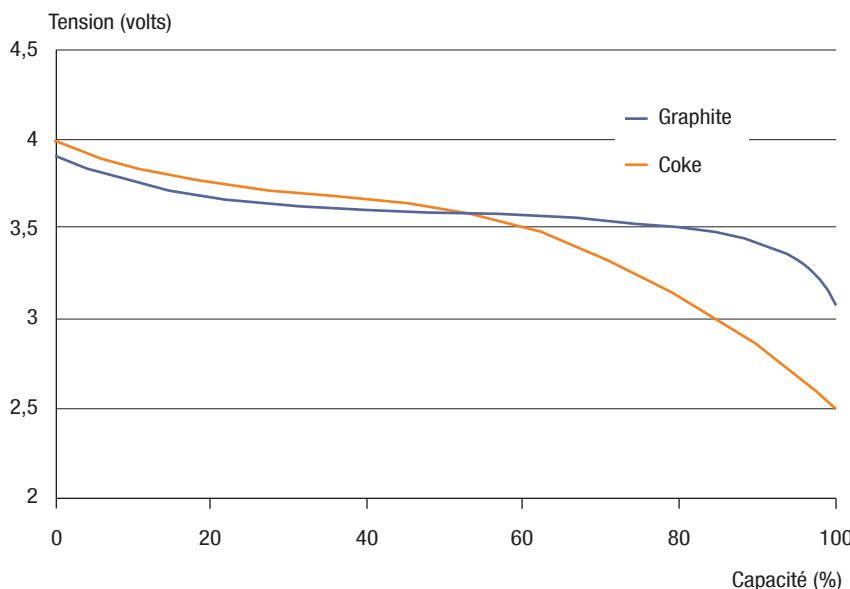
La tension aux bornes de l'accumulateur dépend également de l'état de charge et a tendance à diminuer au cours de la décharge, ce qui conduit à réduire la puissance disponible et à le rendre moins performant à la fin d'un cycle de décharge.

Pour éviter des variations de performances trop importantes d'un accumulateur entre le début et la fin de sa décharge, les constructeurs auront tendance à chercher au contraire un profil de décharge qui soit le plus plat possible. La première pile au lithium conçue par Sony en 1991 comportait ainsi une anode à base de coke, qui entraînait, comme le montre la figure suivante, une division par deux de la tension fournie lors de la décharge.

À partir de 1997, Sony a utilisé du graphite à l'anode. Premier avantage, son énergie spécifique est près de deux fois plus importante (372 mAh/g pour le graphite contre 180 à 200 pour le coke). Deuxièmement, le profil de décharge, plus aplati, permet de ne pas descendre en dessous de 3 volts en fin de décharge.

Notons cependant qu'une légère décroissance de la tension est souhaitable lors de la décharge afin de pouvoir mesurer l'état de charge de la batterie.

✿ **Profils de décharge d'un accumulateur lithium-ion avec une anode à base de graphite ou de coke**



Source : www.buchmann.ca/article5-page2-french.asp

- **La capacité de la batterie (exprimée en ampères-heure, Ah) :** c'est la quantité d'électricité, c'est-à-dire le nombre d'électrons qu'elle peut fournir.

La capacité de la batterie sera limitée par celle de l'électrode la moins performante : les progrès technologiques réalisés sur les électrodes doivent donc être menés de pair. Une électrode particulièrement performante sera inefficace si l'autre ne l'est pas. En pratique, le constructeur veille à ce que les capacités des électrodes utilisées dans un même élément soient équilibrées.

Certaines espèces chimiques ont la capacité de fixer et d'échanger un nombre d'électrons plus important et fonctionnent donc comme un réservoir stockant plus d'énergie par unité de volume et/ou de masse. Une structure pouvant libérer plusieurs anions sera ainsi plus efficace à la cathode : c'est l'un des avantages de l'utilisation du phosphate de fer et de lithium (malheureusement handicapé par sa faible conductivité et par sa masse).

- **L'énergie de la batterie (exprimée en watts-heure, Wh)** : c'est le produit de la quantité d'électricité que peut délivrer la batterie par la tension à ses bornes (pour un courant nul). Pour qu'un véhicule d'environ une tonne parcoure une distance de 100 km à une vitesse de 100 km/h, il lui faudra une énergie d'environ 15 à 20 kWh, voire 28 kWh (conduite sur cycle urbain en conditions hivernales sévères). Pour les véhicules électriques, on envisage donc généralement des batteries de 10 à 30 kWh, avec une tension typique de 300 volts, soit 80 éléments de capacité de 40 à 100 Ah et une puissance comprise entre 20 et 80 kW.

On voit ici l'importance du choix des couples oxydo-réducteurs retenus : plus importante sera la différence de potentiel, plus grande sera l'énergie délivrée. Elle déterminera de fait l'autonomie du véhicule. Le lithium est à la fois le plus léger¹ et le plus réducteur des métaux : l'énergie spécifique d'un accumulateur au lithium est donc plus grande que celle d'un accumulateur au plomb.

- **La puissance de la batterie (classiquement exprimée en W ou en kW)** : c'est l'énergie que peut délivrer la batterie par unité de temps ou encore le produit de la tension par l'intensité du courant. Pour qu'elle ait un sens, la valeur de la puissance d'une batterie doit être associée non seulement au temps pendant lequel elle pourra être débitée, mais aussi à la température et au niveau de charge : dans le cas de l'i-Miev, les spécifications données indiquent que la puissance spécifique d'un élément est de 550 W/kg mesurée sur soixante secondes, à une température de 25 °C et à mi-charge.

Un certain nombre de propriétés s'en déduit :

- une fois choisis les couples oxydo-réducteurs qui détermineront la tension aux bornes de la batterie, l'intensité du courant utilisable sera directement proportionnelle aux surfaces actives des électrodes. Plus la surface active des électrodes sera grande, plus la résistance interne

[1] Bien que son numéro atomique [le nombre de protons contenus dans son noyau] soit seulement de 3, le lithium est sous forme solide. Appartenant au groupe des métaux alcalins, il est aussi très réactif.

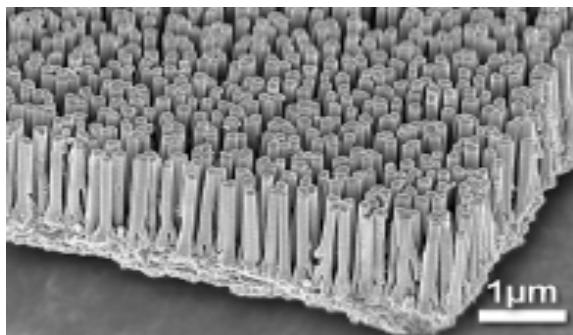
de la pile sera faible et plus l'intensité du courant et donc la puissance seront fortes. **Si on conçoit un accumulateur dont le but est de produire une puissance élevée, on va chercher à augmenter autant que possible la surface des électrodes.** Dans les accumulateurs au plomb de type Planté, ceci a conduit d'une part à utiliser plusieurs plaques de plomb en parallèle et d'autre part à les rainurer. Dans le même esprit, les électrodes des accumulateurs cylindriques de type nickel-cadmium sont constitués de films très minces enroulés en spirale à l'intérieur d'un boîtier. Cette conception a un autre avantage, elle permet de diminuer l'intensité locale du courant : si celle-ci est trop forte, les concentrations présentes aux interfaces des espèces dissoutes peuvent varier de façon notable, conduisant progressivement à abaisser la tension de la pile ;

- **la conception d'une batterie de puissance diffère ainsi de celle visant à assurer la plus grande énergie possible** : dans le premier cas, on cherchera à maximiser, dans un volume donné, la surface des électrodes, ce qui conduira à augmenter également le volume occupé par le séparateur et le collecteur (et à réduire la résistance interne, ce qui favorise également la puissance) ainsi que leur masse, là encore au détriment de l'énergie spécifique de l'élément. Dans le second cas, on cherchera au contraire à maximiser le volume de matière active, quitte à diminuer la surface active et à augmenter la résistance interne de la pile. Ainsi, lorsqu'on réalisera une pile cylindrique dont les électrodes seront enroulées en spirale, un film particulièrement mince correspondra à une pile de puissance, une couche plus épaisse à une recherche d'énergie ;
- **cette recherche de la puissance devrait se prolonger naturellement dans les prochaines années par la mise au point de matériaux nano-structurés dont la surface active sera plus grande.** Ces techniques devraient en effet permettre soit une meilleure structuration (« sculptage ») de la matière afin qu'elle offre une surface plus importante pour l'absorption d'électrons, soit, comme le montre la figure ci-dessous, l'ajout de fils ou structures à la surface d'une cathode ou d'une anode pour augmenter la surface d'échange avec l'électrolyte.



Dépôt de nanofils sur une feuille de cuivre

Les nanostructures permettent d'augmenter la surface de contact entre les composants chimiques.



Source : CNRS (CIRIMAT : Centre interuniversitaire de recherche et d'ingénierie des matériaux), Max-Planck-Gesellschaft

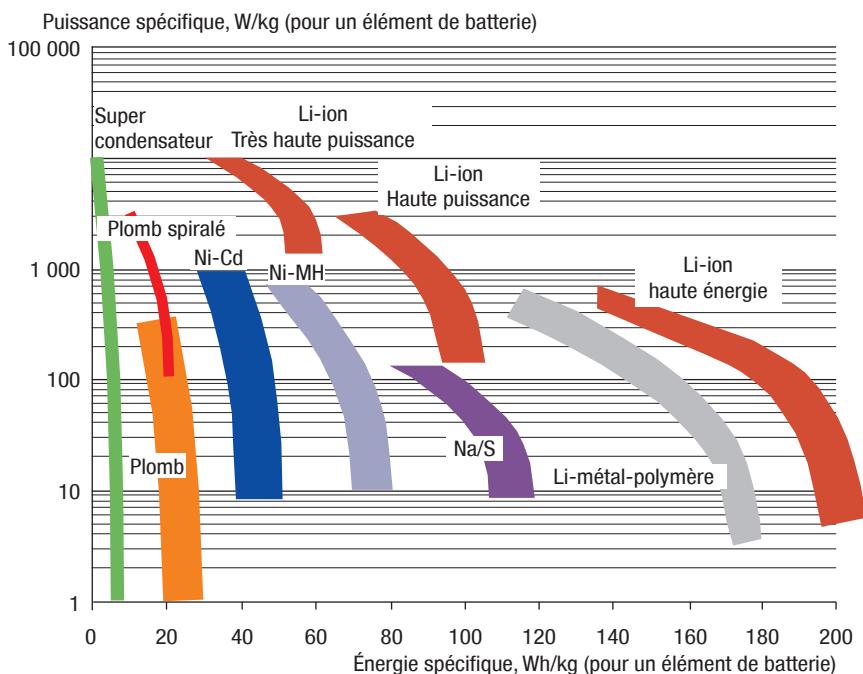
1.4. Le diagramme de Ragone

Dès lors que la masse des batteries va constituer une contrainte importante dans leur utilisation, le diagramme de Ragone, qui représente dans un plan les puissances (W/kg) et énergies (Wh/kg) spécifiques possibles des différentes technologies d'éléments de batteries, est très instructif : il montre très simplement les performances que l'on peut attendre des différents types de batteries en autonomie et en puissance.

Si l'on considère une batterie dont la masse des éléments¹ est de 100 kg et si l'on suppose que l'énergie nécessaire à un véhicule pour parcourir un kilomètre est de 150 watts (ce qui correspond à l'énergie effectivement mise en œuvre dans un cycle normalisé sans utilisation d'auxiliaires), on obtient pour une batterie au plomb une autonomie d'environ 14 km, pour une batterie nickel-cadmium 28 km, pour une batterie nickel-métal hydrure 50 km, et enfin pour une batterie lithium de haute énergie environ 120 km (dans l'hypothèse d'une utilisation sur toute la plage de charge).

[1] La masse totale de la batterie comprend celle de ses éléments, mais aussi des matériaux nécessaires à la composition du module et du pack de batteries, ainsi que du système de gestion de l'énergie de la batterie (pour les lithium-ion). Le rapport entre la masse totale de la batterie et celle de ses éléments peut atteindre un facteur 2 pour les accumulateurs lithium-ion.

Diagramme de Ragone



Source : Anne de Guibert (Saft), Panorama 2010, modifié par le CAS

Si ce diagramme s'appuie sur les valeurs physiques des matériaux utilisés, il dépend également de l'état de la technologie, notamment de la structure des matériaux et de la nature de l'électrolyte. Il peut donc varier dans le temps et suivant ses auteurs. Ainsi les performances des premiers accumulateurs lithium-ion étaient-elles limitées au début des années 1990 à environ 90 Wh/kg : elles sont voisines aujourd'hui, pour les plus performants, de 140 à 180 Wh/kg. Notons toutefois que, pour des ordinateurs, l'entreprise Saft fabrique aujourd'hui des éléments 18650 (dont les dimensions expliquent la dénomination : 18 mm de diamètre et 65 mm de hauteur) dont la densité d'énergie spécifique est de 241 Wh/kg : leur énergie totale est cependant limitée (inférieure à 10 Wh) pour une durée de vie d'environ 200 cycles. Le diagramme fourni ci-dessus permet notamment de retrouver les caractéristiques actuelles des modules des batteries lithium-métal-polymère présentés sur le site Internet de Batscap : énergie de 110 Wh/kg et puissance de crête de 960 kW (correspondant à une énergie de 8 kWh fournie en trente secondes).

Ce diagramme montre que :

- les batteries au plomb ne peuvent emmagasiner une énergie importante et conduiront donc, pour une masse donnée, à une autonomie relativement faible, au contraire de certaines batteries au lithium qui peuvent emmagasiner jusqu'à 10 fois plus d'énergie par kg. La batterie au plomb, présente traditionnellement dans les véhicules thermiques et dont la masse est d'environ 10 à 16 kg, ne peut conférer ainsi qu'une autonomie de quelques dizaines de Wh, donc de quelques centaines de mètres ;
- les supercondensateurs ont une autonomie très limitée mais peuvent absorber et fournir une grande puissance pendant un temps limité, de l'ordre de 5 à 10 secondes ;
- les accumulateurs Ni-Cd et les batteries au plomb peuvent fournir une puissance importante, ce qui explique leur utilisation pour le démarrage des véhicules. Au contraire, les batteries lithium-métal-polymère ou lithium de haute énergie vont être limitées en puissance : pour satisfaire le besoin d'accélération du véhicule, le constructeur aura donc tendance à les associer à des supercondensateurs. C'est la solution actuellement choisie par le groupe Bolloré pour ses véhicules ;
- les batteries lithium-ion peuvent correspondre à des usages très différents, suivant leur mode de conception, comme le montre le diagramme précédent : accumulateurs de très haute puissance pour des applications militaires, de haute puissance pour des applications hybrides ou de haute énergie pour le spatial et les véhicules électriques. Les accumulateurs lithium-métal-polymère seront ainsi destinés à fournir soit une puissance importante lorsque le film utilisé sera ultra-mince, soit une autonomie plus forte lorsque le film sera plus épais. Les satellites Galileo, dont l'énergie provient de panneaux solaires, ou de batteries, lorsque le soleil est caché par la Terre, emportent ainsi des éléments lithium-ion d'une énergie de 165 Wh/kg, alors que celle des véhicules électriques est plus proche de 110 à 140 Wh/kg.

Il est à noter que sur ce diagramme les batteries lithium-air ne sont pas représentées : leurs capacités seront discutées dans la troisième section.

Un autre intérêt du diagramme de Ragone est de donner une première idée des capacités d'autonomie des différentes batteries et des vitesses qu'elles permettent d'atteindre.

La courbe du chapitre 2 (voir page 125), traçant l'évolution de la consommation en fonction de la vitesse et d'une consommation des auxiliaires de 3 kWh, nous indique que la consommation d'énergie d'un véhicule roulant à 150 km/h est d'environ 400 Wh/km. Sa puissance moyenne est donc de 60 kW. Si nous prenons une batterie d'une masse de 250 kg, et que nous supposons que la masse de ses éléments¹ est de 200 kg, nous en concluons que cette vitesse n'est atteignable que si la puissance spécifique des éléments de la batterie est supérieure à 300 W/kg². L'énergie spécifique devra être au moins égale à 100 Wh/kg pour parcourir 50 km, 200 Wh/kg pour 100 km et 300 Wh/kg pour 150 km. Un calcul similaire peut être réalisé pour des vitesses de 50 et 100 km/h, ce qui donne le tableau ci-dessous.



Énergie spécifique nécessaire en fonction de l'autonomie recherchée (avec une batterie de 250 kg, auxiliaires 3 kWh)

Vitesse	Consom- mation	Puissance	Énergie nécessaire pour une autonomie de 50 km	Énergie nécessaire pour une autonomie de 100 km	Énergie nécessaire pour une autonomie de 150 km
50 km/h	170 Wh/km	42 W/kg	42 Wh/kg	85 Wh/kg	127 Wh/kg
100 km/h	230 Wh/km	115 W/kg	57 Wh/kg	115 Wh/kg	172 Wh/kg
150 km/h	400 Wh/km	300 W/kg	100 Wh/kg	200 Wh/kg	300 Wh/kg

Source : CAS

La transcription de ces valeurs dans le diagramme de Ragone nous permet de visualiser les courbes d'autonomie des différents types de batteries.

On constate que, dans ces conditions (masse des éléments de la batterie égale à 200 kg) :

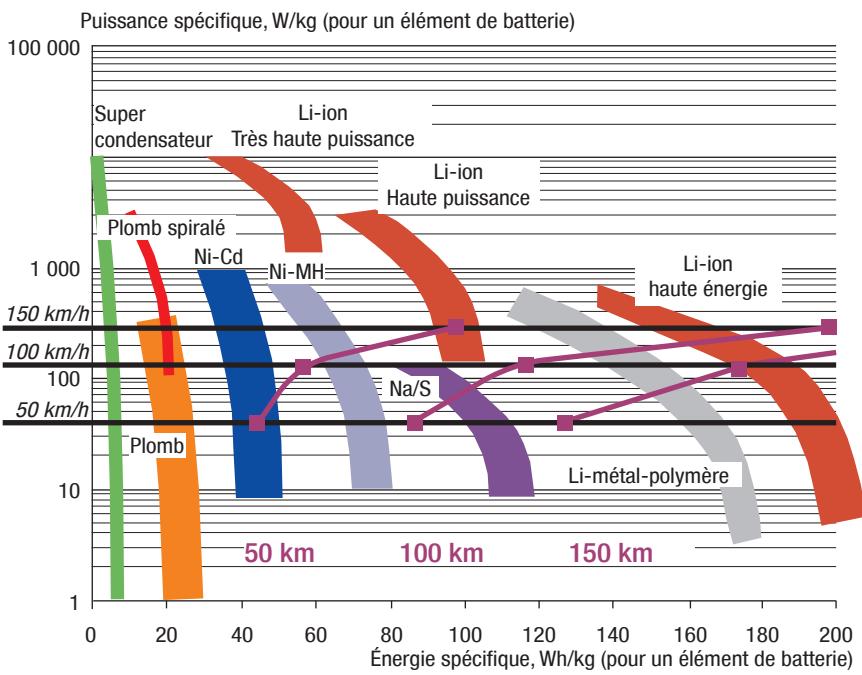
- l'autonomie d'un véhicule circulant à une vitesse de 100 km/h et faisant fonctionner ses auxiliaires à une puissance de 3 kWh est d'environ une cinquantaine de kilomètres pour une batterie nickel-cadmium ; de 100 km pour le lithium-ion haute puissance, et de 150 km pour le lithium-ion haute énergie ;

[1] Pour l'i-Miev, la masse de la batterie est de 200 kg, la masse totale des éléments est d'environ 150 kg.

[2] Ce calcul n'est qu'une approximation : la puissance d'une batterie est inférieure de fait à la somme de la puissance de ses différentes cellules.

- une batterie au plomb peut atteindre une autonomie d'environ 30 km pour une vitesse d'environ 50 km/h : la première version de l'EV1 de General Motors en 1996 utilisait des batteries au plomb pour une autonomie annoncée de 90 à 120 km et un poids de 533 kg (dans des conditions probablement d'utilisation raisonnable de la climatisation !). De fait, ce graphique donnerait plutôt une autonomie de 80 km pour une vitesse de 50 km/h.

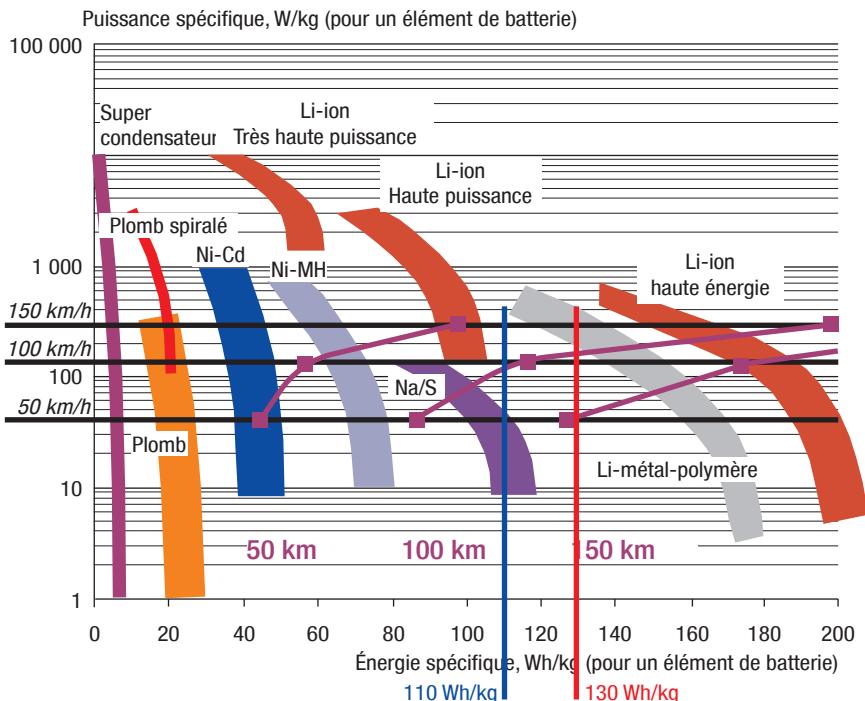
Autonomie des différents types de batteries [en fonction de la vitesse]



Le graphique suivant montre que l'autonomie d'une voiture équipée d'une batterie de 250 kg et d'une énergie disponible de 22 kWh (cas de la Fluence) – correspondant ainsi à une énergie spécifique de ses éléments voisine de 110 Wh/kg – sera d'environ 95 à 100 km/h de moyenne pour une consommation de ses auxiliaires d'environ 3 kWh. Le tableau précédent indique en effet que l'énergie nécessaire pour cette distance est de 23 kW.

Le simple fait d'utiliser des éléments dont l'énergie spécifique serait de 130 kWh/kg pourrait conduire à une autonomie d'environ 115 km.

♡ **Autonomie d'un véhicule en fonction de l'énergie spécifique de sa batterie (de masse donnée)**



Source : Anne de Guibert (Saft), Panorama 2010, modifié par le CAS

2 ■ Les batteries lithium métalliques ont été les premières étudiées mais elles présentent des risques qui ont conduit la plupart des industriels à les abandonner

Historiquement, les premières recherches sur les batteries au lithium utilisaient cet élément sous forme métallique :

- 1912 : premiers travaux du chimiste américain Gilbert Newton Lewis ;
- 1952 : premier brevet connu sur l'utilisation du lithium en électrolyte non aqueux ;
- 1976 : première pile lithium-ion proposée par M. S. Whittingham (université de Binghamton) à Exxon : l'anode était constituée de lithium métallique, la cathode de sulfures de titane.

À aucun moment ces batteries ne vont se développer à grande échelle dans le courant du XX^e siècle pour des applications de forte énergie : elles vont néanmoins trouver des débouchés pour des appareils portables.

Les années 1980 : les accumulateurs à base de lithium métallique et d'un électrolyte liquide

Comme l'indique Anna Teyssot dans sa thèse sur les batteries lithium-métal-polymère¹, plusieurs sociétés industrielles ont cherché à utiliser la découverte de Whittingham et se sont lancées dans la commercialisation d'accumulateurs composés :

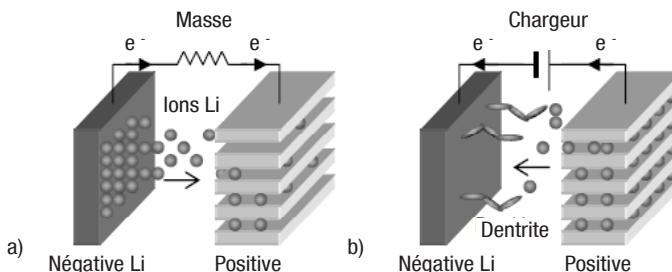
- d'une anode en lithium métallique ;
- d'une cathode à base d'oxyde de manganèse (MnO_2) ou de sulfure de molybène (MoS_2) ;
- d'un électrolyte liquide aprotique chargé en sel.

Ce sera un échec. Lors de la recharge, les ions lithium ne s'accumulent pas de façon homogène sur l'anode mais donnent naissance à des dendrites. Celles-ci peuvent créer des courants de court-circuit ou se casser et conduire à l'apparition de lithium pulvérulent très réactif dans l'électrolyte, ce qui pose de sérieux problèmes de sécurité.

La figure suivante, extraite de la thèse mentionnée, donne une idée schématique de ce fonctionnement et de l'apparition de dendrites lors de la charge sur l'électrode métallique négative.



Principe de fonctionnement d'une batterie Lithium-ion pendant la décharge (a) et la recharge (b)



Source : Teyssot A. (2005), op. cit., page II de l'introduction

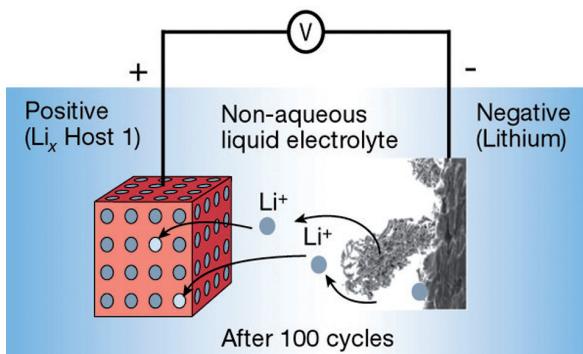
[1] Teyssot A. (2005), *Étude de l'interface lithium métal/électrolyte polymère fondu et gélifié*, thèse soutenue le 27 janvier.

Les années 1990 : les accumulateurs à base de lithium métallique et d'électrolyte liquide

Face à cette difficulté, deux évolutions technologiques vont se développer. La première consiste à modifier le matériau de l'anode et à se détourner du lithium métallique pour s'orienter vers les batteries lithium-ion. La seconde consiste à garder le lithium métallique mais à travailler sur l'électrolyte : Michel Armand propose ainsi en 1978 d'utiliser, avec du lithium-métal à l'anode, un électrolyte sous forme de polymère solide, en l'occurrence du polyoxyde d'éthylène fondu chargé en sel de lithium.



Schéma du fonctionnement d'un accumulateur à base de lithium métallique et d'un électrolyte sous forme de polymère solide



Source : Tarascon J.-M. et Armand M. (2001), « Issues and challenges facing rechargeable lithium batteries », Nature, 414, p. 359-367

Comme l'explique Anna Teyssot dans sa thèse, cette proposition revêt un double avantage :

- la haute viscosité du polymère assure (au moins durant les premiers cycles) un « certain » blocage de la croissance des dendrites : de manière plus précise, la faible conductivité de l'électrolyte limite la puissance de l'accumulateur et donc leur croissance. Elle ne suffit pas cependant à en empêcher l'apparition (contrairement à ce que l'on a pu penser lors des premières utilisations de polyoxyde d'éthylène) ;
- son inertie chimique face au lithium diminue considérablement les risques de combustion, voire d'explosion.

Cette technologie a notamment été développée à la fin des années 1990 par Hydro Québec au Canada et EDF en France.

Elle rencontre néanmoins trois limitations :

- afin d'assurer une conductivité suffisante de l'électrolyte, il est nécessaire de le chauffer à une température de 70 à 80 °C, ce qui en interdit quasi-mént l'utilisation pour les appareils portables (et peut limiter la durée de vie de l'accumulateur) ;
- si la haute viscosité de l'électrolyte freine durant les 600 premiers cycles la formation des dendrites, celles-ci peuvent néanmoins apparaître au-delà¹, limitant ainsi la durée de vie de la batterie. De plus, une couche passivante a tendance à se former autour de l'électrode, conduisant à une perte continue de capacité de l'électrode négative ;
- le refroidissement à température ambiante peut entraîner dans un premier temps l'apparition de fissures dans la couche de passivation autour de l'anode métallique et dans un deuxième temps la croissance de dendrites. Il est donc préférable de garder celui-ci en permanence en température en utilisant une partie de son énergie à le chauffer, ce qui peut conduire à le décharger totalement en une durée que l'on peut estimer en ordre de grandeur à un mois.

Dans ces conditions, la plupart des industriels se sont reportés vers la technologie lithium-ion².

Les années 2000 : les accumulateurs à base de lithium métallique et d'un électrolyte amélioré sous forme de polymère solide

Au moins deux sociétés ont cependant cherché à améliorer cette technique : le groupe Bolloré, qui a acheté en 2002 les brevets d'EDF et créé la société Batscap, et le canadien Avestor³, qui a fait faillite en octobre 2006 (racheté par Bolloré en mars 2007).

Comme le montre la figure suivante prélevée sur le site Internet de Batscap, les batteries lithium-métal-polymère de Bolloré gardent le lithium métallique (conduisant à une énergie spécifique importante en théorie) et retiennent un

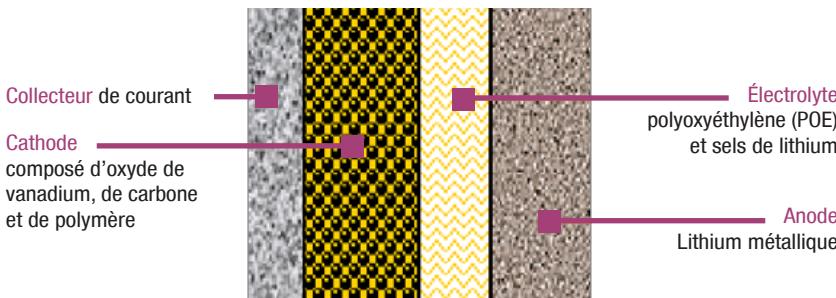
[1] Armand M. et Tarascon J.-M. (2008), « Building better batteries », *Nature*, 451, p. 655.

[2] Une variante de cette technologie a néanmoins été étudiée : l'idée consiste à utiliser à température ambiante un électrolyte polymère gélifié, en imbibant une matrice polymère d'un électrolyte liquide.

[3] Avestor a fait faillite notamment à la suite de plusieurs incendies dans son usine de fabrication à Boucherville ainsi que chez son principal client, la société AT&T, le 13 septembre 2006.

électrolyte sous forme de polymère solide, en l'occurrence du polyoxyéthylène contenant des sels de lithium dissous.

Schéma d'une batterie lithium-métal-polymère



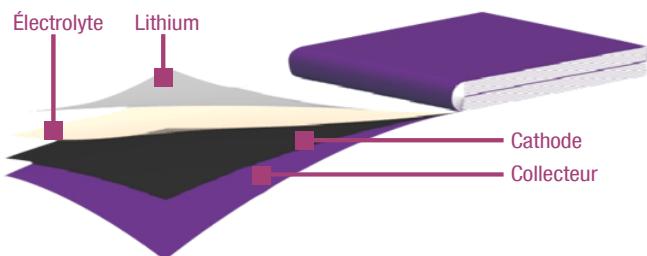
Source : www.batscap.com

Le site Internet précise que, pour obtenir une conductivité optimale, la température de ce polymère doit être maintenue entre 80 °C et 90 °C. Il donne également des renseignements sur la manière dont est réalisé l'accumulateur :

- « la cellule élémentaire (l'élément) de la technologie lithium-métal-polymère est réalisée par assemblage de films ultra-minces : chaque film a une épaisseur de quelques dizaines de microns et une largeur de quelques centimètres. Les films sont empilés, bobinés, puis compressés pour obtenir une conception prismatique » ;
- « l'épaisseur totale du laminé obtenu est d'environ 150 µm, celle-ci dépendant des caractéristiques électriques demandées à l'élément. En effet, modifier l'épaisseur des films permet d'optimiser les performances spécifiques pour répondre à la demande de l'application. Ainsi, assembler des films « épais » permet d'obtenir une configuration de type « haute énergie » alors qu'un élément plus mince se caractérisera par ses performances en puissance ».

Cette technologie est ainsi confrontée à une question d'optimisation entre des électrodes plus épaisses qui permettront une plus grande autonomie mais fourniront moins de puissance, et des électrodes plus fines garantissant une meilleure accélération mais une moins grande autonomie. L'adjonction d'un supercondensateur dans le véhicule peut permettre de choisir des films plus épais, assurant une plus grande autonomie tout en conservant une capacité d'accélération suffisante.

♡ Schéma d'un élément



Source : www.batscap.com

Le pari de cette technologie réside dans la possibilité de surmonter les problèmes associés à la formation de dendrites à la surface de l'anode au moment du rechargement : y contribue la minimisation de la valeur de l'intensité locale grâce à une augmentation très forte de la surface de l'anode, qui se transforme ainsi en un film ultra-mince de quelques dizaines de microns et d'une largeur de plusieurs centimètres.

Si la couche correspondant à l'électrolyte est trop mince, cette technique peut néanmoins trouver une limite avec l'apparition de « trous » dans cette couche lors de la constitution de l'élément.

Seule la mise en service des voitures correspondantes permettra de déterminer si les limitations constatées sur ce type de batteries à la fin des années 1990 ont pu être surmontées.

Le Lawrence Berkeley National Laboratory mène également des travaux sur cette technologie. Il a donné naissance en 2007 à une *start-up* située en Californie, la société Seeo, en lui cédant officiellement un certain nombre de brevets avec une exclusivité absolue d'utilisation. L'accumulateur obtenu repose sur le choix du lithium-métal à l'anode, d'un polymère solide comme électrolyte et d'un lithium-phosphate à la cathode.

L'originalité de cette technologie repose sur la fabrication d'un électrolyte solide à partir de nanomatériaux, ou plus précisément « de deux chaînes de polymères qui s'auto-assemblent en nanostructures : la première dessine un réseau de cylindres conducteurs, noyés à l'intérieur du second qui sert de matrice

solide ». Seeo explique que « le film d'électrolyte est résistant et presque aussi conducteur qu'un électrolyte liquide »¹.

La société espère, là encore, que le polymère utilisé permettra d'éviter la formation de dendrites. Les premiers tests montreraient une bonne durée de vie de ces batteries (supérieure à 1 000 cycles avec moins de 5 % de perte de capacité) et une forte densité spécifique (proche de 300 Wh/kg). Leur recharge serait cependant plus lente et leur puissance plus faible que pour des accumulateurs lithium-ion (en raison d'une conductivité plus faible de l'électrolyte et de la cathode).

Des tests complémentaires, sur de longues périodes, doivent néanmoins être effectués pour vérifier que le polymère permet bien de bloquer l'apparition des dendrites, ce qui n'a jamais été observé pour le moment.

3 ■ L'invention d'une anode en graphite et d'une cathode d'intercalation a permis le véritable essor des accumulateurs lithium-ion

Les travaux déjà évoqués, en particulier ceux du professeur Goodenough, vont permettre le passage de l'accumulateur utilisant le lithium sous forme métallique à la batterie lithium-ion dans laquelle le lithium reste en permanence sous forme ionique.

Dès lors, un accumulateur lithium-ion peut être comparé à une sorte de « rocking-chair² » dans laquelle les ions lithium passent d'une électrode à l'autre selon que la batterie se charge ou se décharge. Le schéma ci-après en donne une représentation simplifiée. Sony en tirera en 1991 sa première batterie lithium-ion, en utilisant d'abord le coke à l'anode, puis, quelques années plus tard, le graphite.

Contrairement à une affirmation parfois énoncée, les accumulateurs lithium-ion reposent également sur l'existence de couples électrochimiques capables de céder ou d'attirer des électrons, même si le phénomène que l'on a tendance à considérer d'abord correspond à l'intercalation des ions lithium dans les matériaux présents à l'anode ou à la cathode.

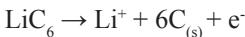
[1] www.impactlab.net/2009/03/27/cheaper-and-more-reliable-lithium-ion-batteries/.

[2] Le mot « swing » est parfois également utilisé.

Les couples électrochimiques mis en œuvre dans les batteries Li-ion sont typiquement visibles dans les demi-réactions produites à chaque électrode. On peut écrire d'une manière générale lors de la décharge :

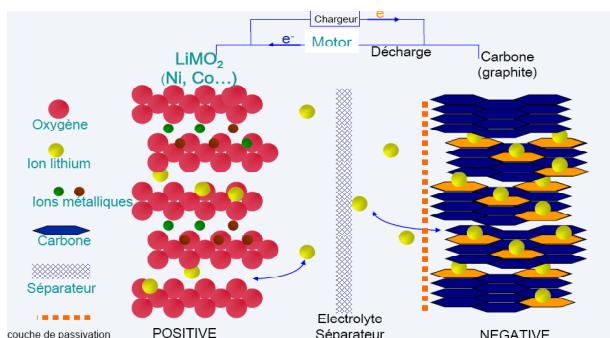
- sur l'électrode positive : $\text{Li}_{1-z} \text{A}_x \text{B}_{y(s)} + z\text{Li}^+ + ze^- \rightarrow \text{LiA}_x \text{B}_{y(s)}$
- sur l'électrode négative : $\text{Li}_z \text{M}_p \text{N}_q \rightarrow z\text{Li}^+ + \text{M}_p \text{N}_q + ze^-$
- avec un bilan : $\text{Li}_{1-z} \text{A}_x \text{B}_{y(s)} + \text{Li}_z \text{M}_p \text{N}_q + ze^- \rightarrow \text{LiA}_x \text{B}_{y(s)} + \text{M}_p \text{N}_q$

Si la négative est composée de graphite, la réaction de décharge s'écrira :



Les compositions d'électrode répondant à cette définition sont très nombreuses et vont conduire à une multitude de variantes.

Schéma d'un accumulateur lithium-ion



Conception : Michel Brousseley (Saft), présentation : Anne de Guibert (Saft), Panorama 2010

L'anode

Intuitivement, les ions lithium se glissent (par diffusion) entre les couches de graphite. Le trait pointillé orange sur la figure correspond à ce que certains appellent un petit miracle de la physique, soit la formation d'une couche de passivation à la surface de l'électrode négative qui :

- empêche l'électrolyte de réagir avec l'électrode (effet passivant) ;
- laisse passer les ions lithium ;
- et se révèle être un isolant électronique.

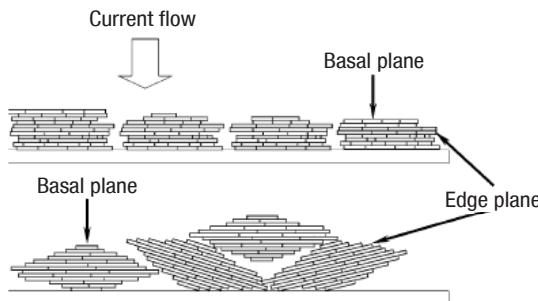
Cette couche de passivation se forme dès le premier cycle de charge (et de décharge) de l'accumulateur : celui-ci est donc réalisé à l'usine de fabrication suivant un protocole parfaitement défini. L'évolution de cette couche constitue également un des principaux facteurs de vieillissement de l'accumulateur : elle va croître au fur et à mesure de la vie de la batterie, ce qui conduira, d'une part, à une consommation des ions lithium, et d'autre part, à une augmentation de sa résistance (ou plus exactement de son impédance).

Soulignons également qu'une augmentation de température de l'accumulateur peut être néfaste pour la couche de passivation qui risque de se fissurer et de se dissoudre, ce qui entraîne de nouvelles réactions entre l'électrode et l'électrolyte.

Lors de la réalisation physique de l'électrode, les feuillets de graphène peuvent s'orienter perpendiculairement au flux d'ions lithium. Or, pour s'intercaler dans le graphite, les ions lithium ne peuvent traverser les feuillets et doivent passer par les espaces contenus entre les feuillets, comme le montre la figure suivante.



Intérêt d'une anode composée de particules sphériques de graphite



Lecture : le schéma montre une anode composée d'une feuille de cuivre (représentée par la ligne blanche horizontale) recouverte de graphite sous forme de feuillets traditionnels (figure du haut) ou de particules de graphite sous forme de sphères (figure du bas).

Les ions lithium se déplacent de haut en bas et s'intercalent beaucoup plus facilement lorsque le graphite est présent sous forme de particules sphériques.

Source : Yoshio M., Wang H., Fukuda K., Umeno T., Abeb T. et Ogumi Z. (2004), « Improvement of natural graphite as a lithium-ion battery anode material, from raw flake to carbon-coated sphere », Journal of Materials Chemistry, vol. 14(11), p. 1754-1758

Les techniques actuelles d'anode retiendront plutôt l'utilisation de graphites dits mésoporeux, dans lesquels l'orientation des feuillets est désordonnée. L'anode sera composée de particules de graphite sous forme de sphères, voire de « patatoïdes ». Malheureusement, le coût du graphite artificiel ainsi utilisé est plus élevé.

L'oxyde de lithium et de titane, $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$, commercialisé par Toshiba, constitue un composant alternatif particulièrement intéressant pour l'industrie. S'il possède un potentiel moins élevé que le graphite, ce qui tend à réduire son énergie spécifique, en revanche, il présente une particularité qui lui confère une sécurité intrinsèque appréciable : son utilisation n'entraîne pas de réaction chimique avec l'électrolyte. Le lithium ne se dépose donc pas à l'interface entre les deux et aucune dendrite ne se forme. Cette particularité lui confère également *a priori* de bonnes capacités de vieillissement et une capacité de recharge plus rapide. Ses avantages résident donc dans d'excellentes performances en puissance et en durée de vie, une capacité de recharge très rapide mais, en contrepartie, une très faible densité d'énergie.

La cathode

Dès lors va s'engager une course pour mettre au point la meilleure technologie possible d'intercalation des ions lithium à la cathode. De manière simplifiée, elle va se dérouler suivant quatre directions en fonction de la forme de la structure cristalline de l'électrode.



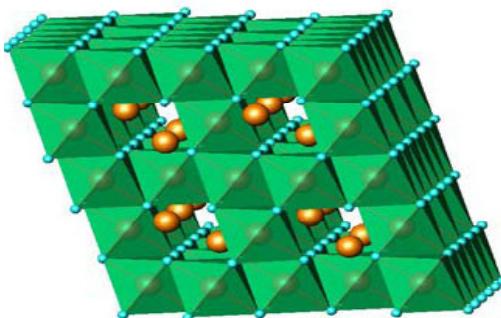
Les différentes cathodes : un état de l'art

	Li Metal Oxides		Li Metal Phosphates	
Structure	2D Layered	3D Spinel	3D Olivine	3D Nasicon
Formula	LiMO_2	LiM_2O_4	LiMPO_4	$\text{Li}_3\text{M}_2(\text{PO}_4)_3$
Materials	LiCoO_2	LiMn_2O_4	LiFePO_4	$\text{Li}_3\text{V}_2(\text{PO}_4)_3$
	$\text{LiNi}_{0,8}\text{Co}_{0,15}\text{Al}_{0,05}\text{O}_2$			
		$\text{LiNi}_{1/3}\text{Mn}_{1/3}\text{Co}_{1/3}\text{O}_2$		

Source : Degussa

- la découverte par John Goodenough de l'intérêt des structures lamellaires (entre lesquelles se glissent les ions lithium) va conduire à une première série d'électrodes : les trois les plus couramment utilisées seront le dioxyde de lithium et de cobalt (une technologie dont Goodenough est le père), le NCA (nickel-cobalt-aluminim) et le NCM (nickel-cobalt-manganèse) ;
- en 1983, Goodenough met en évidence l'intérêt du manganèse (sous forme spinelle¹) à la cathode : LiMn_2O_4 . Dans cette structure, l'ion lithium est entouré de quatre atomes d'oxygène et le manganèse (en vert sur la figure suivante) de six. Cette structure cristalline donne naissance à des « canaux concourants » comme le montre cette figure où les ions lithium apparaissent sous forme de sphères dorées ;

❖ **Structure cristallographique du dioxyde de manganèse et de lithium (LiMn_2O_4) sous forme spinelle**



Source : Destruel P et Pluchet J. (2010), État de la R & D dans le domaine des batteries pour véhicules électriques au Japon, rapport d'étude, Ambassade de France au Japon (octobre) : www.bulletins-electroniques.com/rapports/smm10_041.htm

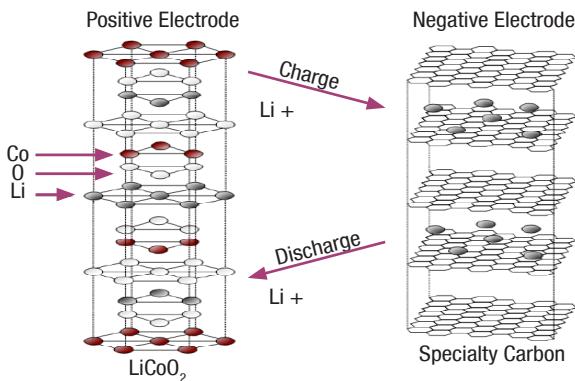
- en 1989, Goodenough montre qu'une structure pouvant libérer plusieurs anions est plus efficace à la cathode : en 1996, il identifie notamment le phosphate de fer et de lithium (en particulier celui avec une structure d'olivine) comme étant un bon matériau pour la cathode ;
- enfin, plus récemment, Sony a retenu une nouvelle cathode sous forme de Nasicon.

[1] Structure cristalline commune de composition de type AB₂O₄ où A est un cation en site tétraédrique (entouré de 4 oxygènes) et B, deux cations en sites octaédriques (entouré de 6 oxygènes).

Chacune de ces cathodes va donner lieu à des développements industriels plus ou moins importants qui sont à la base de nombreux travaux et études. Nous n'en donnerons ici qu'une présentation très simplifiée :

- le matériau type de la cathode est le dioxyde de lithium et de cobalt¹. Les batteries les plus courantes aujourd'hui dans les téléphones mobiles et les ordinateurs portables utilisent encore l'oxyde de cobalt comme cathode. C'est également la technologie choisie par Tesla. Mais l'oxyde de cobalt est réactif et particulièrement cher, si bien qu'il n'est quasiment pas utilisé pour les batteries de véhicules électriques ;

✿ **Schéma du fonctionnement d'un accumulateur avec une cathode à partir de dioxyde de cobalt**



Source : www.electronics-lab.com/articles/Li_Ion_reconstruct/

[1] « Le dioxyde de cobalt et de lithium, également appelé oxyde mixte de cobalt et de lithium, est le composé chimique de formule LiCoO_2 . C'est un solide dont la structure a d'abord été calculée de façon théorique avant d'être confirmée notamment par diffraction aux rayons X : cette structure est lamellaire, pouvant être représentée comme des couches d'octaèdres CoO_6 d'atomes de cobalt et d'oxygène entre lesquelles s'insèrent des atomes de lithium. C'est la structure lamellaire du LiCoO_2 qui lui permet de jouer efficacement le rôle de cathode dans les accumulateurs au lithium :

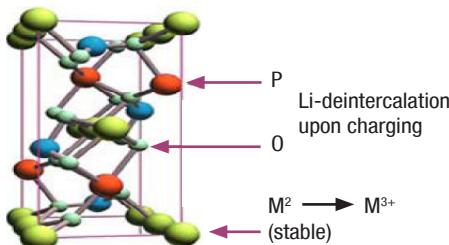
- en charge, la cathode LiCoO_2 est reliée à la borne positive d'un générateur, permettant de libérer des cations Li^+ dans l'électrolyte en direction de l'anode, reliée à la borne négative du générateur : l'anode 's'épaissit' d'un dépôt de lithium venu de la cathode à travers l'électrolyte, tandis que la cathode se 'vide' de son lithium entre les couches d'octaèdres CoO_6 ;
- en décharge, la cathode se 'reconstitue' en fixant des cations Li^+ de l'électrolyte qui viennent s'insérer entre les couches d'octaèdres CoO_6 en absorbant un électron tandis que des cations Li^+ passent en solution dans l'électrolyte du côté de l'anode en libérant un électron : ces réactions sont à l'origine de la force électromotrice de ce type d'accumulateurs.

L'oxyde mixte de cobalt et de lithium est toxique en raison du cobalt qu'il contient, et doit être manipulé avec précaution » (source : Wikipédia).

- le NCA, $\text{Li}(\text{NiCoAl})\text{O}_2$, oxyde de nickel dopé avec de l'aluminium et du cobalt (15 %), présente une très bonne aptitude en termes de cyclage et de durée d'utilisation, nécessaires aux applications professionnelles. C'est probablement l'électrode qui possède la plus grande énergie spécifique : elle va donc être recherchée pour l'autonomie qu'elle confère. Compte tenu de l'énergie qu'elle peut libérer en cas d'augmentation de température, elle demande néanmoins à être associée à un système de gestion de la batterie sans défaut. Saft souligne ainsi dans ses présentations qu'il bénéficie d'une expérience sans égale de plus de quinze ans avec l'oxyde de nickel dopé (NCA) dans des applications professionnelles. Son coût est toutefois relativement élevé ;
- le NMC, $\text{Li}(\text{NiMnCo})\text{O}_2$, avec 33 % de nickel, 33 % de manganèse et 33 % de cobalt. Son énergie spécifique est légèrement inférieure (d'environ 10 %) à celle du NCA. Il présente l'inconvénient de nécessiter de fortes quantités de cobalt, une ressource rare et coûteuse. Il est donc peu utilisé actuellement pour les véhicules électriques, même si d'autres compositions (50/30/20, par exemple) requièrent une moins grande quantité de cobalt ;
- le LiMn_2O_4 , électrode choisie par Nissan et Mitsubishi, présente un avantage considérable : il permet de limiter le risque d'emballement thermique. Son coût est en outre relativement peu élevé. En revanche, son énergie spécifique est inférieure à celle du NCA (d'environ 20 %) et du NMC (d'environ 10 %). De plus, sa durée de vie est plus faible en raison d'une part d'une tension légèrement plus élevée (qui favorise les réactions chimiques notamment à la cathode et accélère le vieillissement, même si elle confère une puissance supérieure à l'accumulateur), mais surtout de la dissolution possible du manganèse dans l'électrolyte. Différentes pistes existent pour éviter la dissolution du manganèse. Elles consistent notamment à doper le manganèse avec du nickel et du cobalt ou à revêtir la surface de l'électrode d'une fine couche d'oxyde ;

- le LiFePO_4 , dont l'utilisation à la cathode résulte de découvertes successives :

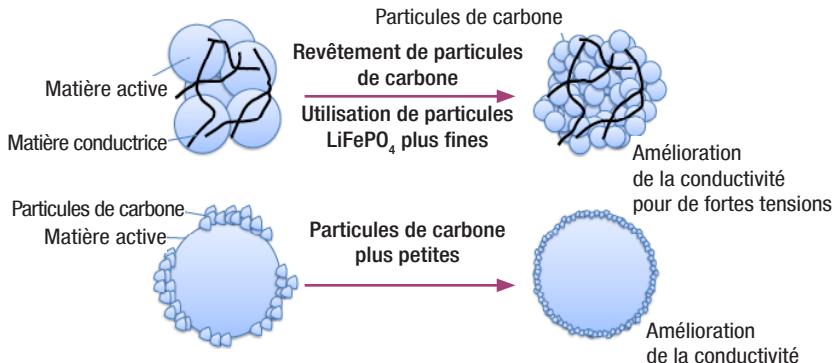
❖ Nanophosphate dopé



Source : www.a123systems.com

- en 1989, Goodenough montre qu'une structure pouvant libérer plusieurs anions est plus efficace à la cathode ;
- en 1996, il identifie notamment le phosphate de fer et de lithium (en particulier celui avec une structure d'olivine) comme étant un bon candidat pour la cathode. Dans une structure de type olivine, et contrairement aux cathodes lamellaires, les éléments phosphore et oxygène sont fortement liés. L'oxygène n'est donc pas susceptible de réagir avec les molécules de solvant de l'électrolyte, même sous l'effet d'un échauffement. Le risque d'emballement thermique est donc très faible, si bien que ce matériau est intrinsèquement sûr. Mais ce matériau, mauvais conducteur, ne peut être utilisé en l'état ;
- Michel Armand montre ensuite que le dépôt d'un revêtement de carbone sur les grains de matière active permet d'assurer une certaine conductivité, tout en laissant passer les ions lithium, ce qui rend ce matériau utilisable comme électrode positive ;

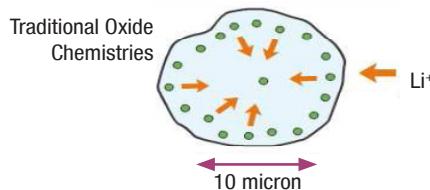
♡ Augmentation de la conductivité de LiFePO_4



Source : Destruel P. et Pluchet J. (2010), op. cit.

- en 2001, le docteur Yet-Ming Chiang, chercheur au MIT, crée l'entreprise A123 Systems qui commercialise des batteries avec de l'oxyde de phosphate de fer à la cathode ;
- inconvénient néanmoins, les matériaux sous forme d'olivine présentent une mauvaise conductivité électrique. Yet-Ming Chiang obtient cependant en 2002 une très forte amélioration des performances de la cathode grâce à un accroissement de la conductivité en dopant le matériau avec de l'aluminium, du niobium et du zirconium¹ ;
- en 2004, il utilise à la cathode des particules de phosphate de fer de moins de 100 nanomètres de diamètre, ce qui augmente notablement la surface de la cathode : le graphique suivant illustre cette propriété :

♡ Structure cristallographique du phosphate de fer et de lithium



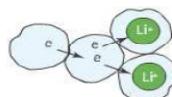
Source : www.a123systems.com

[1] Cette modification lui permet également de s'affranchir des brevets déposés par John Goodenough !

♡ Augmentation de la surface de la cathode par l'utilisation de nanoparticules de phosphate de fer

Nanophosphate Material

 $< 0,1$ micron
100 times smaller than conventional oxides



Orders of magnitude more conductive than conventional phosphates

Source : www.a123systems.com

♡ La recharge d'une batterie en cinq minutes n'est pas possible en l'état actuel de la technologie

En 2009, deux chercheurs du MIT, Byoungwoo Kang et Gerbrand Ceder, font paraître dans la revue *Nature*¹ un article montrant qu'il est possible de recharger une cathode composée de phosphate de fer et de lithium en quelques minutes grâce à la création d'un revêtement particulier qui permet aux ions lithium de se déplacer à la surface du matériau avant de « s'engouffrer dans les tunnels de la structure ». Depuis, le mythe de la recharge d'un véhicule électrique en cinq minutes s'est diffusé très largement. Or cet article comportait des approximations que dénoncent quelques mois plus tard², dans des termes très vigoureux, plusieurs auteurs dont le professeur Goodenough :

- le phénomène de recharge en quelques secondes n'est pas le résultat d'une expérimentation mais d'une extrapolation pour le moins approximative ;
- la charge et la décharge ne sont pas des phénomènes symétriques : or la rapidité du phénomène n'a été montrée que pour la décharge ;
- l'accélération de la vitesse de déplacement des ions lithium n'a été montrée qu'à la périphérie de l'électrode et non dans sa masse [qui conditionne la vitesse de la charge] ;
- la vitesse de la recharge est déterminée par l'électrode sur laquelle les phénomènes chimiques seront les plus lents : or, dans le cas d'un accumulateur graphite/phosphate de fer et de lithium, c'est le graphite et non le phosphate de fer qui commande la vitesse de réaction ;

[1] Kang B. et Ceder G. (2009), « Battery materials for ultrafast charging and discharging », *Nature*, 458, p. 190-193.

[2] Zaghib K., Goodenough J. B., Mauger A. et Julien C. (2009), « Unsupported claims of ultrafast charging of LiFePO₄ Li-ion batteries », *Journal of Power Sources*, 194(2), p. 1021-1023.

- la vitesse de la recharge doit être limitée pour prévenir l'apparition de dendrites à l'anode.

Le texte se termine par l'estimation de la chaleur dégagée par la recharge en cinq minutes, sous une tension de 200 volts, d'une batterie de 15 kWh (dont la résistance serait de 0,25 ohm) ; l'intensité du courant devrait être de 900 ampères et la chaleur dégagée serait de 60 millions de joules, soit l'équivalent du chauffage d'un immeuble de quatre étages. Pour garder la batterie à une température normale, il faudrait alors la refroidir par un volume de 170 litres d'eau qui passerait d'une température normale à son point d'ébullition. Ainsi, même si la recharge d'une batterie actuelle était technologiquement envisageable en cinq minutes [ce qui n'est pas le cas aujourd'hui], il serait recommandé, pour des raisons de sécurité évidentes, de ne pas y recourir !

Dans ce contexte, compte tenu de la chaleur dégagée et de l'apparition possible de dendrites à l'anode, les durées de recharge rapide ne peuvent guère descendre en-dessous de quelques dizaines de minutes.

Au total, le LiFePO₄ est une structure qui présente de nombreux avantages : elle est sûre, peu coûteuse en raison de l'absence de matériaux rares, et généralement créditée d'une bonne durée de vie à température ambiante. À noter, cependant, que si la composition chimique des différents éléments n'est pas parfaitement pure, les ions ferreux peuvent se dissoudre dans l'électrolyte. Là réside la principale interrogation concernant ce matériau : si la plupart des notateurs lui attribuent une excellente durée de vie, notamment à température ambiante, une des personnes interrogées dans le cadre de la mission nous a indiqué que ce type de batteries était sujet à des défaillances non prévisibles après un certain nombre de cycles. Il souffre en outre de deux inconvénients : une densité d'énergie spécifique relativement faible (qui compromet son utilisation dans les transports) ainsi qu'une mauvaise tenue à froid. Enfin, si pour les autres accumulateurs lithium-ion, la tension est directement fonction de la capacité chargée avec une pente suffisante pour en faire un bon indicateur de l'état de charge, il n'en est pas de même avec la chimie du phosphate de fer, ce qui oblige à mettre en œuvre d'autres stratégies de mesure de l'état de la batterie.

Deux améliorations technologiques sont possibles :

- la première réside dans l'emploi du manganèse à la place du fer : le potentiel électrochimique du LiMnPO₄ par rapport au lithium est de 4,2 volts contre 3,4 volts pour le fer. Sa conductivité est malheureusement encore plus faible et nécessite des recherches supplémentaires ;

- la seconde consiste à remplacer le groupement phosphate par un sulfate et, dans le même temps, le fer par du fluor. Premier avantage : le fluor permet une meilleure densité de charge et un accroissement du potentiel de l'électrode (3,6 volts contre 3,45 volts pour le phosphate de fer). Deuxième avantage : la conductivité de ce matériau semble nettement meilleure que celle du phosphate de fer et de lithium et ne nécessite pas de recourir à des nanoparticules revêtues de carbone. La synthèse d'un fluorosulfate de lithium¹, annoncée en novembre 2009, réalisée par le professeur Jean-Marie Tarascon et son équipe du Laboratoire de réactivité et de chimie de solides de l'université Jules-Verne (Picardie), ouvre donc une piste prometteuse, non seulement pour ce corps mais pour d'autres oxyanions² de fluor.

L'électrolyte

L'électrolyte est la dernière composante importante. Compte tenu de la tension élevée entre les électrodes (qui pourrait entraîner une réaction d'électrolyse de l'eau), il doit être strictement anhydre.

Les électrolytes actuellement les plus utilisés se basent sur un ou plusieurs solvants organiques dans lesquels sont dissous des sels de lithium :

- le carbonate d'éthylène (qui présente une constante diélectrique relativement élevée) facilite en particulier la formation de la couche de passivation sur une anode en graphite durant la première charge et évite ainsi que les molécules du solvant ne s'incorporent dans le matériau de la cathode (à la place des ions lithium) ;
- le carbonate de propylène (PC) ;
- les carbonates de diméthyle (DMC) ou de diéthyle (DEC) ;
- le carbonate d'éthyle-méthyle (EMC).

Ils comportent également un certain nombre d'additifs afin d'améliorer la sécurité ou la formation de la couche de passivation.

Les électrolytes organiques présentent cependant des risques d'incendie, voire d'explosion. En outre, la plage de tension qu'ils peuvent supporter est limitée :

[1] Recham N., Chotard J.-N., Dupont L., Delacourt C., Walker W., Armand M. et Tarascon J.-M. (2010), « A 3.6V lithium-based fluorosulphate insertion positive electrode for lithium-ion batteries », *Nature Materials*, 9(1), p. 68-74.

[2] Un oxyanion est un composé chimique dont la formule générique est la suivante : $AxOyz-$ (où A représente un élément chimique et O un atome d'oxygène).

des recherches sont donc menées sur la mise au point d'électrolytes à base de liquide ionique. Ceux-ci sont constitués de sels dont la température de fusion est inférieure à 100 °C : ils sont donc liquides à température ambiante. Une bonne sélection permet ainsi d'obtenir des électrolytes :

- stables entre – 20 et + 60 °C (plage d'usage des batteries embarquées) ;
- ininflammables ;
- avec une fenêtre électrochimique de 5 volts ;
- avec une grande stabilité chimique (vis-à-vis de l'eau).

Mais le prix de ces liquides ioniques reste élevé.

Annexe 2

Le moteur thermique à essence ou diesel, en constante évolution, a encore un bel avenir devant lui

La consommation de carburant d'une automobile dépend d'un grand nombre de facteurs : poids, résistance de l'air, résistance au roulement des pneumatiques, rendement du moteur et gestion de la plupart des équipements consommateurs d'énergie¹.

1 ■ Les progrès à attendre des motorisations conventionnelles, en matière de maîtrise de la combustion, sont très nombreux, avec une certaine convergence essence-diesel

À l'heure actuelle, la quasi-totalité des automobiles fonctionne avec des motorisations conventionnelles, à essence ou diesel. Si, en Europe, les moteurs diesel dominent de plus en plus le marché automobile (on parle de « diesélisation » du parc automobile), ceci n'est pas vrai dans le monde entier. En effet, les véhicules à essence sont aujourd'hui dominants aux États-Unis et en Asie, avec des parts de marché d'environ 94 % en Amérique du Nord et de 75 % en Asie (hors Japon). À l'inverse, sur le marché européen, la part de marché des motorisations essence n'était plus, en 2007, que de 26 % en France et de 44 % à l'échelle européenne.

[1] Cette annexe est extraite du rapport du Centre d'analyse stratégique intitulé *Perspectives concernant le véhicule « grand public » d'ici 2030*, rédigé sous la présidence de Jean Syrota, octobre 2008, www.strategie.gouv.fr/article.php3?id_article=957.

💡 Le contenu énergétique des carburants

Les quantités de chaleur que peuvent fournir un kilogramme d'essence (super 98) et un kilogramme de gazole pendant la combustion sont sensiblement identiques : 42 700 kJ/kg pour l'essence, 42 600 kJ/kg pour le gazole. Si l'on exprime ces grandeurs rapportées au litre de carburant – unité de base des transactions commerciales et des performances en termes de consommation aux 100 kilomètres –, il faut tenir compte de la *différence de densité* des deux liquides : en moyenne 0,75 kg/litre [0,72-0,78] pour l'essence, en moyenne 0,84 kg/litre [0,82-0,85] pour le gazole. Cette considération conduit à diminuer d'environ 10 points les surconsommations apparentes observées par le consommateur (notamment les consommations conventionnelles indiquées dans les documents commerciaux des constructeurs).

Cette situation provient principalement, en dehors des effets des multiples taxations des carburants, des différences de caractéristiques entre moteurs diesel et moteurs à essence. Les seconds ont comme avantages sur les premiers de coûter moins cher à la fabrication et de permettre une meilleure maîtrise des gaz d'échappement. La contrepartie est que les moteurs à essence entraînent une surconsommation de carburant par rapport aux moteurs diesel, qui est partiellement inhérente à leur principe de fonctionnement. Ainsi, la moyenne des consommations aux 100 km peut être estimée, pour le gazole, à environ 20 % au-dessous de celle du super, malgré un parc de véhicules plus puissants (en puissance réelle), cet écart étant ramené à 10 % si l'on tient compte de la différence de densité des carburants.

À l'avenir, les progrès les plus importants que pourraient faire les motorisations essence et diesel seront de nature différente et poursuivront des objectifs différents : *réduction de la consommation pour les moteurs à essence et maîtrise des émissions polluantes pour les moteurs diesel* (à titre d'exemple, les normes Euro 5 imposent, outre un abaissement des rejets de particules, une réduction de quasiment 30 % des émissions d'oxydes d'azote, et les normes Euro 6 imposeront sans doute des réductions du même ordre). Ainsi, les évolutions tant réglementaires que technologiques vont amener ces deux types de motorisations à converger dans les prochaines années, aussi bien sur le plan de leur impact environnemental (émissions et consommation) que sur le plan de leurs principes de fonctionnement (modes de combustion, technologies utilisées). Ce phénomène de convergence prévisible est initié depuis le début des années 2000, avec la mise en œuvre, dans les moteurs diesel puis dans les moteurs à essence, d'un concept appelé « *downsizing* ».

1.1. Le « *downsizing* » est à même de réduire la consommation en conservant la même performance

Le *downsizing* est un concept exploité pour le développement des moteurs plus économies qui consiste à réduire la cylindrée d'un moteur sans en dégrader les performances dynamiques. La réduction de la cylindrée d'un moteur permet de limiter les pertes par friction (réduction des frottements mécaniques à l'intérieur du moteur car les surfaces sur lesquelles ils s'exercent sont réduites), ce qui augmente le rendement du moteur. Le *downsizing* a un autre effet positif qui est de limiter le poids du moteur, ce qui contribue aussi à réduire la consommation du véhicule.

Pour concevoir de tels moteurs, les constructeurs se sont appuyés sur des technologies améliorant l'injection du carburant et de l'air dans les moteurs, lesquelles ont fait des progrès importants ces dix dernières années :

- pour le carburant, c'est la technologie dite de *l'injection directe* qui s'est imposée. Le principe est de disposer d'un système de mise sous pression du carburant dans une rampe qui alimente les différents cylindres par des injecteurs commandés électroniquement (d'où le nom d'« injection par rampe commune » ou « *common rail* »). Depuis une vingtaine d'années, les pressions d'injection des moteurs diesel ont été multipliées par un facteur 10, pour atteindre 2 000 bars sur les moteurs actuellement commercialisés, ce qui permet de pulvériser beaucoup plus finement le gazole. Les moteurs à essence ont aussi bénéficié de cette technologie, bien que plus tardivement et en ayant recours à des pressions environ dix fois moindres ;
- pour l'air, c'est la technique de *la suralimentation* qui a été utilisée. Le principe est d'introduire de l'air sous pression dans le cylindre, cette mise en pression étant en général opérée en récupérant une partie de l'énergie cinétique des gaz d'échappement. Ainsi, les développements des moteurs diesel ont été conditionnés ces dernières années par les progrès obtenus sur les turbocompresseurs.

Ce sont les moteurs diesel qui ont pu bénéficier les premiers du *downsizing* car les technologies d'injection directe et de suralimentation y étaient plus adaptées. La diffusion de ces nouveaux moteurs date de la fin des années 1990 pour les moteurs diesel, et du milieu des années 2000 pour les moteurs à essence. La mise en œuvre du *downsizing* a été à l'origine de réductions de consommation considérables, car il permet des gains pouvant atteindre 25 %, à performance égale.

Le *downsizing* devrait permettre de nouveaux gains de consommation durant la décennie 2010. Il bénéficiera de l'adoption de technologies, décrites dans la suite, telles que la recirculation des gaz d'échappement, la levée variable des soupapes, mais aussi des techniques d'hybridation thermique/électrique qui permettront d'équiper les véhicules de moteurs thermiques moins puissants, mais assistés par des moteurs électriques pour les phases d'accélération.

1.2. Les technologies de combustion, améliorées par l'introduction de l'électronique, pourraient connaître des progrès importants

Les technologies de combustion constituent les éléments qui différencient classiquement les moteurs à essence et les moteurs diesel. Pour schématiser, le diesel utilise un principe d'*autoallumage* du mélange air-carburant grâce à une pression importante et le moteur se régule par l'admission de gazole. Le moteur diesel fonctionne en mélange pauvre (c'est-à-dire avec un excès d'air). En conséquence, les oxydes d'azote ne peuvent pas être éliminés par la catalyse trois voies, au contraire du moteur à essence qui utilise un système d'allumage commandé par une bougie et est contrôlé par l'admission d'air. Le moteur à essence, qui bénéficie de ce dispositif de post-traitement, émet moins de polluants que le moteur diesel, mais son système d'alimentation en air le pénalise sur le plan de la consommation.

Néanmoins, partant de ces avantages comparés, ces deux technologies pourraient converger durant la décennie 2010. En effet, de nouveaux processus de combustion sont en cours de développement :

- pour les *moteurs diesel*, il s'agit du processus dit HCCI (« *Homogeneous charge compression ignition* », c'est-à-dire combustion à autoallumage par compression en mélange homogène) ;
- pour les *moteurs à essence*, il s'agit du processus CAI (« *Controlled auto-ignition* », c'est-à-dire combustion de l'essence par autoallumage préréglé).

Le procédé HCCI

Le HCCI est, pour un moteur à combustion interne, un mode de combustion dans lequel l'air et le carburant sont mélangés de la manière la plus homogène possible (comme dans les moteurs à essence), mais le mélange est comprimé à des pressions suffisantes pour atteindre le point d'autoallumage (comme dans les moteurs diesel).

La combustion n'étant pas déclenchée par une bougie mais par la pression dans un mélange homogène, son démarrage se fait de manière quasi simultanée dans presque la totalité du mélange air-carburant. C'est pour cette raison que ce mode de combustion est particulièrement difficile à contrôler. Ainsi, ce n'est pas uniquement une meilleure compréhension de la physique de la combustion qui permet la mise au point de la combustion HCCI, mais ce seront avant tout les progrès réalisés dans l'électronique qui permettront de piloter ce processus d'auto-inflammation. La combustion en mode HCCI est possible pour des charges moyennes ou faibles des moteurs, c'est-à-dire qu'un moteur devrait être capable durant les phases d'accélération de revenir à un mode de combustion traditionnel diesel.

❖ Prototype Opel Vectra équipé d'un moteur à combustion HCCI

Depuis plus d'une dizaine d'années, la combustion HCCI est étudiée chez les constructeurs et les équipementiers spécialistes des systèmes d'injection (Bosch, etc.). Selon IFP, qui participe à la recherche sur ce nouveau mode de combustion, la maîtrise de l'HCCI devrait être suffisante pour envisager une commercialisation durant la première moitié de la décennie 2010. On peut citer, à titre d'exemple, les travaux menés par General Motors, qui a déjà réalisé des prototypes roulants en 2007, sur la base d'une Saturn Aura et d'une Opel Vectra. Selon le constructeur, des gains de 15 % en consommation seraient accessibles à condition d'utiliser notamment un moteur à injection directe et une activation électrique des soupapes. Ces gains sont comparables à ce qu'annoncent les équipementiers Bosch ou Valeo.

Mais ce ne sont pas tant les gains de consommation qui seraient intéressants dans la technologie HCCI pour les moteurs diesel (l'injection directe, le contrôle des soupapes permettent sans doute de réaliser des gains comparables) que l'obtention de bons résultats en matière d'émissions de NOx.

Le procédé CAI

Le mode de combustion CAI est une voie de progrès pour les motorisations à essence. Ce procédé peut permettre de pallier certains défauts des moteurs à essence actuels. Dans ces moteurs, la combustion dans le mélange entre l'air et l'essence est déclenchée par une bougie. Ainsi, l'allumage n'est pas obtenu de manière homogène, puisqu'il démarre de la bougie, ce qui génère des points chauds et des pics de température au sein de la chambre de combustion. La combustion CAI a pour objectif de faire s'allumer le mélange entre l'air

et l'essence de manière quasi simultanée dans tout le cylindre. Cela permet d'optimiser la combustion en la régularisant. L'allumage ne serait donc plus obtenu par une bougie mais par autoallumage, comme dans les moteurs diesel, contrôlé par la pression et la température dans le cylindre. Afin de contrôler la pression et la température à l'intérieur du cylindre, le mode CAI nécessiterait d'introduire une recirculation des gaz d'échappement du moteur. Toutefois, les moteurs à essence ne pourront pas se passer d'un dispositif de déclenchement de la combustion (bougie par exemple) car le mode de combustion CAI n'est pour l'instant envisagé que pour les charges partielles du moteur, ce qui exclut les phases nécessitant une accélération importante du véhicule. Ainsi, tout comme le HCCI pour les moteurs diesel, le CAI ne sera mobilisable que sur certaines plages de fonctionnement des moteurs.

Certains constructeurs ont d'ores et déjà révélé des prototypes de véhicules équipés de moteurs capables de fonctionner en mode de combustion CAI. C'est le cas de Daimler-Mercedes, dont le prototype Mercedes F700 utilise ce mode de combustion.

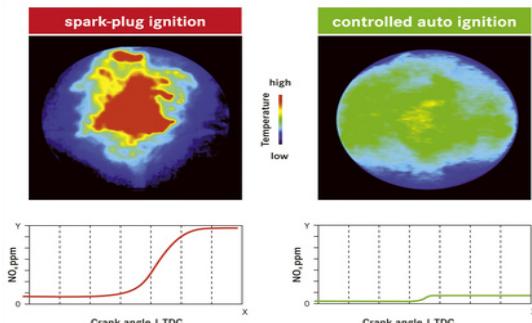
Concept car Mercedes F700 Diesotto

Il s'agit d'un véhicule qui intègre plusieurs technologies pour réduire la consommation de carburant : poids, aérodynamique, motorisation hybride (moteur thermique 238 ch, moteur électrique 20 ch), transmission automatique à 7 rapports. Les performances de ce véhicule sont comparables à celles de la Mercedes Classe S350 : accélération de 0 à 100 km/h en 7,3 contre 7,5 secondes. La consommation normalisée en cycle européen est de 5,3 l/100 km et les émissions de CO₂ de 127 g/km, soit des valeurs réduites quasiment de moitié (10,5 l/100 km pour la S 3.5 V6). La consommation pourrait être encore substantiellement réduite à condition d'accepter une certaine réduction des performances, comme cela est expliqué plus loin : on peut en effet s'interroger sur la nécessité de telles performances dynamiques (bridées à 200 km/h, mais capable de plus de 250 km/h).

L'illustration suivante permet d'apprécier la différence entre les modes de combustion classique et CAI. La cartographie des températures dans un cylindre lors de la combustion permet d'illustrer l'homogénéité de la combustion CAI.



Le modèle Mercedes-Benz Diesotto : l'autoallumage des moteurs diesel appliqué à l'essence



Source : Daimler Chrysler 2007

Néanmoins, les moteurs à mode de combustion CAI ne sont pas suffisamment au point pour être commercialisés à très court terme, car ils souffrent encore d'une grande sensibilité aux variations de caractéristiques des carburants et ont une plage d'utilisation faible. L'IFP estime que cette motorisation pourrait être commercialisée en masse d'ici la fin des années 2010. Différentes sources (IFP, équipementiers) indiquent que des gains de consommation compris entre 10 % et 15 % peuvent être espérés avec cette technologie.

1.3. Les améliorations du groupe motopropulseur passent aussi par un meilleur pilotage des cycles de combustion, grâce notamment à l'électronique

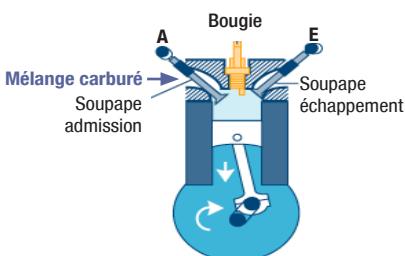
Sur chaque cylindre d'un moteur à combustion interne, un système de soupapes permet l'admission du mélange d'air et de carburant (pour la combustion) et l'évacuation des gaz d'échappement. Ainsi, sur un moteur classique à 4 cylindres, on peut compter 8 ou 16 soupapes suivant que chaque cylindre est équipé d'une ou de deux soupapes d'admission et d'échappement.

À l'heure actuelle, sur la quasi-totalité des moteurs thermiques, les soupapes sont commandées par un système mécanique qui empêche de moduler la durée d'ouverture des soupapes. L'illustration suivante schématisé le principe de fonctionnement d'un moteur à 4 temps et montre les 4 étapes qui permettent d'exploiter une combustion et de transformer un mouvement linéaire du piston à l'intérieur d'un cylindre en un mouvement rotatif.

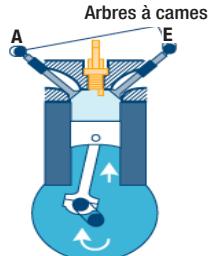


Principe de fonctionnement d'un moteur à 4 temps (cas du moteur à essence à allumage commandé)

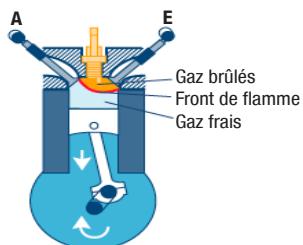
1. Admission du mélange carburé



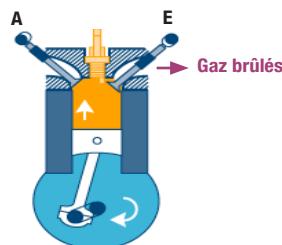
2. Compression du mélange carburé



3. Combustion/détente



4. Échappement des gaz brûlés



Source : IFP

La commande électromagnétique des soupapes

Une voie de progrès majeure pour les moteurs à combustion interne réside dans une meilleure maîtrise de ce cycle par un pilotage optimisé des soupapes d'admission et d'échappement. En effet, à l'heure actuelle, dans un moteur thermique, toutes les soupapes sont pilotées par un même axe mécanique, appelé *arbre à cames*, lui-même actionné par l'axe qui relie tous les pistons, le *vilebrequin*. Ce fonctionnement permet de concevoir des moteurs à plusieurs cylindres, tout en les synchronisant, mais ne permet pas de moduler les durées d'ouverture de chacune des soupapes ou de désactiver certains cylindres. Or ces possibilités permettraient d'adapter le fonctionnement du moteur au besoin de puissance de la voiture. C'est une cause de perte majeure de rendement dans un moteur. Ainsi, une amélioration très importante consisterait à

disposer d'un système capable de piloter indépendamment chaque soupape. L'ouverture et la fermeture des soupapes seraient commandées par un système électromagnétique.

Ces systèmes de gestion des soupapes pourraient se diffuser largement dès le début de la décennie 2010. On peut citer à titre d'exemple le système e-valve mis au point par l'équipementier Valeo. Les données fournies par Valeo indiquent *un gain en consommation de carburant de 15 % à 20 %*. Il s'agit là d'une version optimisée, qui aura sans doute des variantes. Néanmoins, selon différentes estimations d'acteurs de l'industrie automobile, la commande électromagnétique des soupapes permettrait d'obtenir des réductions de consommation d'au moins 10 %.

Le pilotage des pistons (variation du taux de compression)

En complément du système de contrôle des soupapes, un progrès – d'un intérêt encore incertain – pourrait venir du pilotage des pistons. Aujourd'hui, la course d'un piston est toujours la même, ce qui fige le taux de compression du moteur (rapport entre volume maximal et volume minimal de la chambre de combustion). Plus ce rapport est grand, plus on exploite la détente des gaz de combustion, mais plus on perd de puissance. Pour éviter cet inconvénient, les motoristes pourraient, à l'avenir, développer des moteurs à taux de compression variable. C'est un concept déjà ancien dans l'industrie automobile. En 1928, Louis Damblanc a déposé un brevet pour moteur à taux de compression variable. Dans les années 1980, Volkswagen et Saab ont testé des moteurs puis abandonné cette piste pour manque de fiabilité.

Aujourd'hui, des travaux ont repris sur ce concept. Ainsi, en France, la société MCE-5 a inventé un système permettant de moduler le volume de la chambre de combustion. Cette modulation est obtenue par l'ajout d'une pièce faisant varier la hauteur du piston dans l'axe du cylindre. Cette technologie doit encore être améliorée pour avoir une chance d'être commercialisée car le surcroît de masse, le manque de résistance mécanique et le coût de la solution actuelle posent problème. Une collaboration entre MCE-5 et PSA, initiée en 2001, vise une industrialisation sur petites séries (milliers ou dizaines de milliers de véhicules par an) d'ici une dizaine d'années.

Le taux de compression variable permettrait d'obtenir des gains de consommation de 5 % à 7 %.

Autres innovations

D'autres innovations, en apparence plus modestes, permettront aussi des gains significatifs de consommation. On peut citer des optimisations de la gestion thermique du moteur. Par exemple, Valeo a développé une vanne permettant de gérer l'intégralité du flux du liquide de refroidissement dans le moteur, qui pourrait entraîner une **réduction de 4 % de la consommation**.

Enfin, dans les moteurs thermiques, l'existence de nombreuses masses en mouvement entraîne des pertes importantes par frottements. **Des optimisations sur ces frottements pourraient conduire à réduire la consommation d'environ 5 %** (estimations fournies par différents experts). À titre d'exemple, on peut citer la Logan ECO2, pour laquelle un gain de 2 g CO₂/km (soit environ 2 %) a été obtenu « simplement » par un ajustement de certains jeux de pièces mécaniques et un choix d'huiles à basse viscosité pour réduire les frottements à l'intérieur du moteur et des transmissions, et fluidifier l'huile dans la boîte de vitesses.

2 ■ Pour les véhicules thermiques, la gestion de l'électricité est une source de réduction de consommation significative

La production d'énergie électrique dans une voiture à moteur thermique a un très faible rendement, du fait de la complexité du processus : l'énergie chimique du carburant est, dans un premier temps, transformée en énergie mécanique par le moteur, puis en courant électrique par l'intermédiaire d'un alternateur. Une voie d'amélioration consisterait à convertir directement l'énergie thermique des gaz d'échappement en courant électrique par un effet thermoélectrique. Cette technologie ne devrait toutefois pas être diffusée en masse avant la fin des années 2010.



Alternateur LI-X, développé par Bosch

À titre d'exemple, l'alternateur LI-X développé par Bosch permet un gain en compacité par rapport à la génération précédente d'alternateurs comparables. Il est capable, selon le constructeur, de fournir 40 % de puissance supplémentaire, tout en engendrant des gains de consommation qui peuvent aller jusqu'à 0,5 l/100 km.

Plus généralement, ce n'est pas seulement la chaîne de production de l'énergie électrique qui devra faire l'objet d'améliorations, mais aussi sa chaîne d'utilisation. En effet, si la production d'électricité dans une voiture thermique est une opération à faible rendement, les constructeurs auront tout intérêt à gérer au mieux le niveau de charge de la batterie qui stocke cette électricité. Cette voie est très prometteuse à court terme, comme l'a montré récemment le cas de la Logan ECO2 : un gain de 4 g CO₂/km a été obtenu par Renault grâce à un pilotage de l'alternateur qui permet de charger la batterie au juste nécessaire. Cette modification se traduit par une charge moins fréquente de la batterie, ce qui explique la moindre consommation d'énergie.

3 ■ Les moteurs thermiques pourraient voir leur consommation réduite de 30 % à 40 % par rapport à la situation actuelle

Durant la décennie 2010, les technologies et améliorations présentées ici ne pourront naturellement pas toutes se développer massivement. Pour autant, ce bref aperçu permet d'illustrer l'importance des progrès qui peuvent être accomplis pour réduire la consommation des motorisations thermiques. Le tableau suivant liste les potentiels de réduction de consommation associés à chaque technologie décrite précédemment. Il s'agit d'ordres de grandeur prudents.

❖ Réduction potentielle des consommations du réservoir à la roue

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

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

Source : CAS

LA VOITURE DE DEMAIN : CARBURANTS ET ÉLECTRICITÉ

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

Annexe 3

Les perspectives de progrès communs à tous types de véhicules

1 ■ Les évolutions conduisant au véhicule du futur résulteront autant de perfectionnements techniques que d'une modification des comportements et d'une meilleure organisation du secteur du transport individuel

Les leviers sur lesquels on peut jouer s'inspirent des considérations générales suivantes : le transport routier comporte trois segments : les déplacements par voiture particulière, le transport routier de fret et, entre ces deux segments, un ensemble disparate intégrant les transports collectifs urbains, les flottes captives, les véhicules de livraison, les taxis, etc. L'agrégation des voyageurs-kilomètres ou des tonnes-kilomètres – comme cela se pratique souvent dans les études prospectives –, de même que la consolidation de statistiques énergétiques assemblant des consommations d'essence et de gazole représentent mal une réalité complexe, dans la mesure où les fondamentaux dans ces trois segments apparaissent très différents. Or la prise en compte de cette segmentation des consommations semble un élément clé d'une stratégie intégrée et équilibrée. S'il est donc peu raisonnable d'envisager à très court terme des modifications majeures sur la voiture individuelle et sur les camions, le segment intermédiaire pourrait évoluer rapidement grâce à des politiques urbaines qui commencent à émerger partout en Europe, en particulier en France.

Les évolutions peuvent être de différentes natures ; on évoquera en particulier :

Des modifications de comportement

- Une conduite rendue plus économique par l'information et la formation à « l'éco-conduite » ;
- le respect rigoureux des limitations de vitesse en vigueur ;
- la diminution de la mobilité des personnes, sans remise en cause de la liberté de se déplacer.

Celle-ci peut être stimulée par exemple par :

- la sensibilisation aux enjeux d'une modération volontaire des déplacements et du changement des modes de déplacement (un quart des déplacements motorisés en Île-de-France sont de moins d'un kilomètre et pourraient se faire, pour l'essentiel, sans recours à un véhicule automobile) ;
- le développement des substituts au transport (télétravail, services en ligne, etc.) ;
- le développement des vélos électriques ainsi que des petits véhicules urbains électriques en libre-service (système « autolib ») ;
- les incitations au développement du covoiturage ;
- la taxation des carburants, les péages urbains, la mise en œuvre pour les péages de modulations adaptées dans le temps (en ville, sur autoroutes, sur voies rapides) ;
- le coût du parking ;
- l'aménagement du territoire et, en particulier la densification des agglomérations, la répartition des centres locaux de services.

Il est clair que certaines de ces actions sont d'effet presque immédiat, alors que d'autres s'inscrivent dans des perspectives à long terme.

Une meilleure organisation du secteur des transports

Celle-ci passe par le développement des modes alternatifs à la route, chacun dans sa zone de pertinence :

- les transports collectifs urbains et périurbains dans les grandes agglomérations ;
- les TGV pour la longue distance (ville à ville).

En ce qui concerne les déplacements de courtes distances, cette optimisation doit pouvoir bénéficier d'initiatives destinées à réduire la circulation, de façon plus ou moins contraignante (aménagements urbains, offre de moyens de locomotion alternatifs, péages, etc.). Il est probable qu'une telle évolution sera de nature à structurer le marché, voire à le segmenter – ce qui peut conduire à multiplier le nombre de voitures –, et donc à favoriser l'apparition de nouveaux modèles dédiés majoritairement ou exclusivement à l'usage urbain (véhicules électriques notamment).

Les progrès technologiques en matière de véhicules

- Dans l'immédiat : *objectif d'émission, pour les constructeurs européens, de 130 g CO₂/km à l'horizon 2012 dans un premier temps (objectif Europe), de 120 g CO₂/km dans un second temps*, ce qui nécessite naturellement un accord au niveau européen. Pour que le renouvellement naturel du parc se réalise effectivement avec des véhicules émettant peu de CO₂ et si possible s'accélère, le rétablissement d'un système de *bonus-malus avec malus annuel* assis sur les émissions de CO₂ paraît être le dispositif le plus efficace. Cette mesure serait beaucoup plus performante que l'augmentation du prix de la carte grise, laquelle ne s'appliquerait qu'aux véhicules neufs (ou d'occasion), ce qui aurait tendance à ralentir leur achat et à favoriser la pollution puisque les automobilistes seraient ainsi enclins à conserver des voitures plus anciennes et plus polluantes.
- À moyen et long terme : on ne peut anticiper valablement sur les évolutions fiscales et réglementaires, tant les décisions politiques en ce domaine peuvent être inattendues compte tenu de tous les facteurs qui pèsent sur ces décisions, notamment au plan européen. Notons à ce stade que beaucoup d'incertitudes subsistent sur les perspectives d'évolution du régime fiscal appliqué aux biocarburants de deuxième génération, au GNV ou à l'électricité utilisée pour la charge des batteries des véhicules électriques ou hybrides rechargeables.

2 ■ La diminution des performances dynamiques deviendra incontournable

L'une des voies particulièrement efficaces pour augmenter la performance énergétique est la diminution des performances dynamiques. L'analyse des données sur le parc automobile actuel permet, à technologie inchangée, de mettre en évidence des potentiels importants d'amélioration de l'efficacité

énergétique des automobiles. En effet, une relation étroite existe entre les performances dynamiques d'une automobile et la performance énergétique du véhicule. Ce paragraphe illustre cette relation et montre que, à technologie constante, une réduction modérée des performances dynamiques des véhicules pourrait apporter une contribution notable à l'amélioration de la performance énergétique des automobiles. Ces considérations concernent les véhicules à essence ou diesel, mais elles s'appliquent bien évidemment à tout type de véhicules, quel que soit le mode de propulsion.

Les indicateurs de la performance dynamique d'une voiture

Pour un modèle donné de voiture, la puissance du moteur se décline en un nombre restreint d'indicateurs : le couple maximal utilisable, la vitesse maximale atteignable sur piste (ou sur autoroute en Allemagne), l'accélération généralement mesurée par le temps nécessaire pour atteindre 100 km/h départ arrêté ou les 1 000 m départ arrêté, le temps nécessaire pour passer de 80 à 120 km/h, etc.

Ces indicateurs, du moins ceux relatifs à la vitesse maximale ou à l'accélération, sont souvent mis en évidence dans les revues spécialisées dans l'automobile et dans les publicités pour satisfaire et entretenir l'attrait de la performance sportive et l'ego de l'automobiliste.

Ce paragraphe fournit une analyse de la relation entre la performance des véhicules et leur consommation. Il fait apparaître que la réduction des performances est un levier permettant de diminuer significativement la consommation des véhicules, sans nuire à la sécurité – au contraire – ou à la liberté que procure une automobile. La performance des véhicules sera mesurée par les deux paramètres les plus couramment utilisés dans l'industrie automobile : vitesse maximale et temps nécessaire à l'accélération de 0 à 100 km/h.

Comparaison de la performance des voitures

Afin d'analyser la relation entre la performance des véhicules et leur consommation, on choisit de comparer ce couple « performance-consommation » à partir de données issues de différents constructeurs automobiles.

Parmi les différents segments du marché automobile, on peut effectuer l'analyse sur le segment des voitures dites « compactes » (segment M1 ou C dans les dénominations de l'industrie automobile). Ce sont de petites berlines, d'une longueur comprise entre 4,05 m et 4,5 m, également appelées « familiales

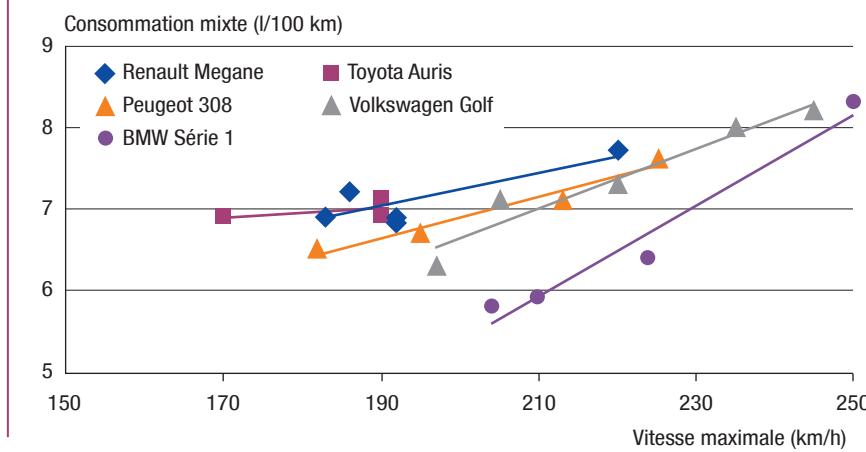
compactes ». Dans ce segment, les volumes de vente sont très importants : en 2007, sur les dix véhicules les plus vendus en France, cinq appartenaient à ce segment de marché (source : CCFA).

Pour analyser la relation entre performance et consommation des véhicules de ce segment, les données relatives à cinq des modèles de ce segment de marché ont été collectées (directement sur les notices techniques des constructeurs) : deux modèles de groupes français (Peugeot 308 et Renault Mégane), deux modèles de groupes allemands (BMW Série 1 et Volkswagen Golf) et un modèle d'un groupe japonais (Toyota Auris). Il s'agit de berlines compactes, dont les longueurs sont comprises entre 4,2 m et 4,27 m. Chacun de ces modèles propose plusieurs motorisations essence et plusieurs motorisations diesel.

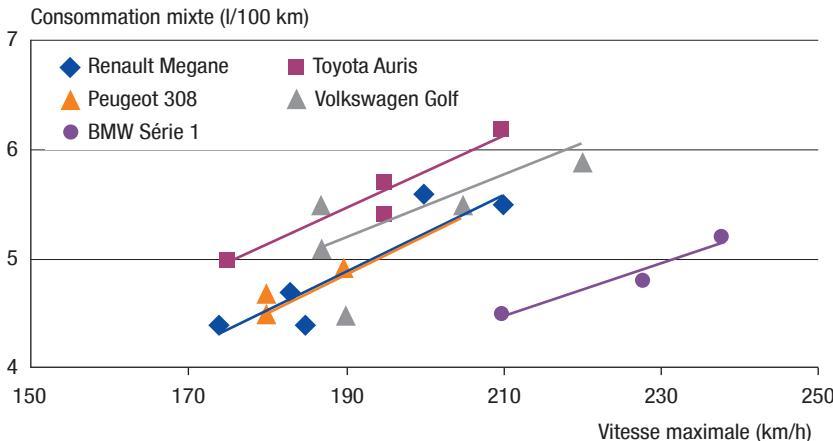
2.1. Une vitesse de pointe inutilement élevée coûte très cher en consommation

Le premier critère de performance dynamique d'une voiture est *la vitesse maximale*. En effet, les modèles cités ci-dessous permettent tous d'atteindre des vitesses très largement supérieures aux 130 km/h, vitesse maximale autorisée en France ainsi que dans la plupart des pays européens (à l'exception notable de l'Allemagne). Les graphiques suivants présentent la relation entre vitesse maximale des véhicules et la consommation mixte en carburant (la consommation mixte étant pondérée sur cycle urbain et sur route à vitesse stabilisée selon les tests normalisés).

Relation consommation mixte - vitesse maximale Voitures essence



Relation consommation mixte - vitesse maximale Voitures diesel



Source : CAS d'après données constructeurs (juillet 2008)

Ces graphes conduisent au constat suivant : à modèle équivalent, l'augmentation de la performance du véhicule de 10 km/h en vitesse maximale se fait au prix d'une dégradation importante de la performance énergétique du véhicule, comprise entre 0,2 et 0,4 l/100 km dans le cas des moteurs diesel, entre 0,2 et 0,6 l/100 km dans le cas des moteurs à essence.

Des études menées par l'INRETS fournissent des résultats concordant, en montrant que l'accroissement de la vitesse de pointe de 10 km/h à la construction d'un modèle se traduisait par une augmentation de consommation de 0,4 à 0,7 l/100 km en ville et de 0,2 à 0,3 l/km sur route.

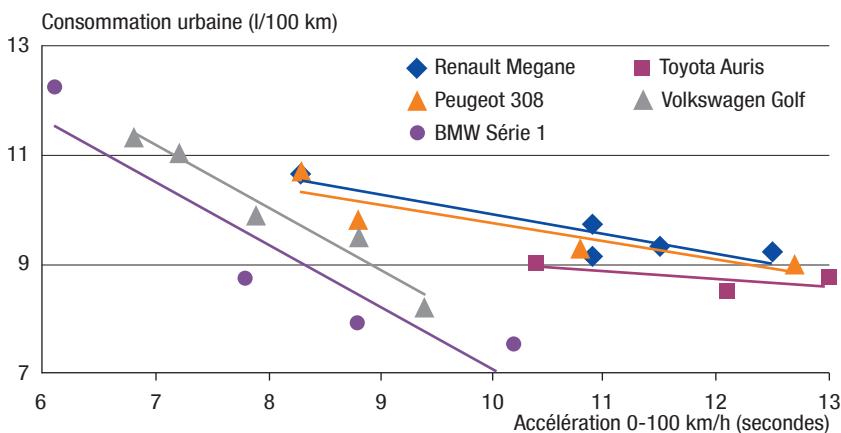
Ainsi, la mise sur le marché de véhicules capables de rouler largement au-delà des limites de vitesses autorisées a un double impact négatif pour les automobilistes : cela les expose au danger de telles vitesses (danger d'accident ou risque de contravention) et les amène, à mode de conduite identique, à consommer à tous les régimes plus de carburant qu'avec des véhicules aux performances plus limitées. On conçoit dès lors l'importance des propositions commerciales des constructeurs et de l'attitude des consommateurs au moment de l'acquisition d'un véhicule.

2.2. Une accélération inutilement élevée coûte très cher en consommation

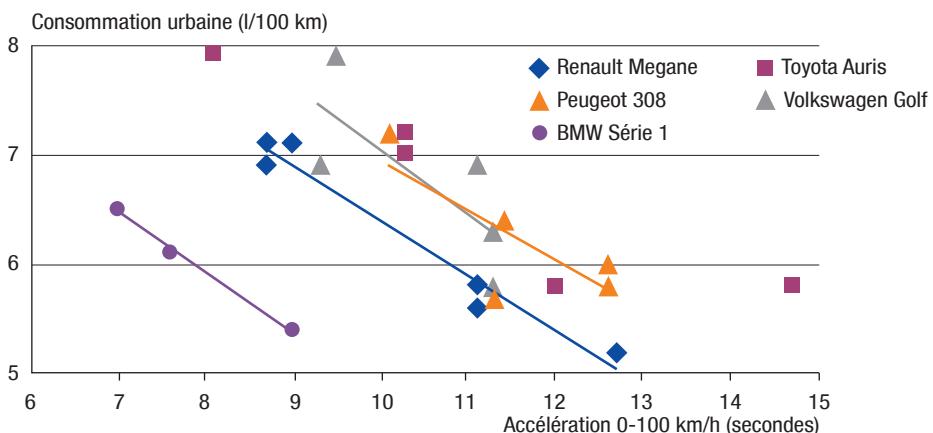
Le second critère de performance dynamique est *l'accélération*. À la différence de la vitesse maximale, qui fait l'objet de limitations en fonction du type de route, les réglementations ne limitent pas l'accélération des véhicules. C'est une des raisons pour lesquelles ce paramètre a tendance à différencier les véhicules.



Relation consommation urbaine - accélération Voitures essence



Relation consommation urbaine - accélération Voitures diesel



Source : CAS d'après données constructeurs (juillet 2008)

Ces graphes appellent la conclusion suivante : à modèle équivalent, l'augmentation de la performance du véhicule de 1 seconde sur le segment 0-100 km/h se traduit par une dégradation importante de la performance énergétique du véhicule, comprise entre 0,3 et 0,6 l/100 km dans le cas des moteurs diesel, entre 0,3 et jusqu'à 1 l/100 km dans le cas des moteurs à essence en cycle urbain.

Les graphiques précédents illustrent, pour les motorisations aussi bien essence que diesel, la relation qui existe entre la consommation en carburant (mesurée par la consommation mixte) et l'accélération (mesurée par le temps nécessaire pour passer de 0 à 100 km/h).

Ainsi l'augmentation des performances dynamiques d'une automobile implique toujours une diminution significative de la performance énergétique. Notons que ce résultat s'applique aussi bien pour des constructeurs généralistes que pour des constructeurs qui misent sur les performances sportives de leur véhicule.

2.3. Vouloir des performances inutilement élevées coûte particulièrement cher en ville

On s'intéresse ici au segment des berlines compactes à vocation familiale, qui sont généralement prévues pour des trajets de longue distance avec cinq personnes à bord. Sur le marché européen, ces véhicules ont une longueur qui varie entre 4,50 m et 4,80 m.

Pour illustrer la relation entre performance et consommation des véhicules de ce segment de marché, les données relatives à quatre de ses modèles ont été collectées (directement sur les notices techniques des constructeurs) : deux modèles de groupes français (Peugeot 407 et Renault Laguna), deux modèles de groupes allemands (BMW série 3 et Volkswagen Passat). Ce sont des berlines familiales dont les longueurs varient entre 4,55 m et 4,76 m.

Chacun de ces modèles propose plusieurs motorisations essence et plusieurs motorisations diesel. Ci-dessous, on compare pour chacun d'entre eux les performances et les consommations de la motorisation la plus puissante et de la motorisation la moins puissante que chaque constructeur propose.

Performance et consommations

Moteurs diesel	Performance (0-100 km/h en secondes)	Vitesse maximale	Consomma- tion en ville	Consomma- tion mixte
BMW Série 3				
Minimum	9,3	210	5,1	4,7
Maximum	6,2	250 (bridage)	9,1	6,7
Volkswagen Passat				
Minimum	12,1	188	7,2	5,6
Maximum	8,6	223	8,5	6,5
Peugeot 407				
Minimum	11,7	192	6,8	5,3
Maximum	8,5	230	11,7	8,4
Renault Laguna				
Minimum	12,1	192	6,1	4,9
Maximum	8,5	222	8,6	6,5
Moteurs essence	Performance (0-100 km/h en secondes)	Vitesse maximale	Consomma- tion en ville	Consomma- tion mixte
BMW Série 3				
Minimum	10,8	210	7,7	5,9
Maximum	5,6	250 (bridage)	13,2	9,1
Volkswagen Passat				
Minimum	12,4	190	10,1	7,7
Maximum	6,9	246	13,9	9,8
Peugeot 407				
Minimum	10,3	203	10,5	7,7
Maximum	6,4	235	14,5	9,8
Renault Laguna				
Minimum	11,7	192	10,4	7,6
Maximum	7,8	232	11,5	8,2

Source : CAS d'après données constructeurs (juillet 2008)

Ces données brutes permettent de calculer, pour chaque modèle et pour chaque type de motorisation, les écarts de performances dynamiques et de performances énergétiques entre la motorisation la plus puissante et la moins puissante :

❖ **Écart entre motorisation la plus puissante et la moins puissante**

	0-100 km/h, secondes	Vitesse maxi. km/h	Consom- mation ville [l/100 km]	Consom- mation mixte [l/100 km]
Moteurs essence				
BMW Série 3	48 %	19 %	71 %	54 %
Volkswagen Passat	44 %	29 %	38 %	27 %
Peugeot 407	38 %	16 %	38 %	27 %
Renault Laguna	33 %	21 %	11 %	8 %
Moteurs diesel				
BMW Série 3	33 %	19 %	78 %	43 %
Volkswagen Passat	29 %	19 %	18 %	16 %
Peugeot 407	27 %	20 %	72 %	58 %
Renault Laguna	30 %	16 %	41 %	33 %

Source : CAS d'après données constructeurs (juillet 2008)

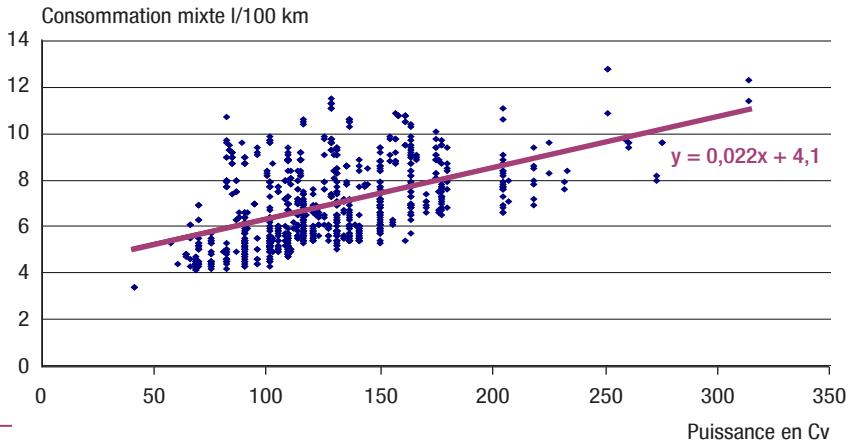
Ces données montrent que, sur le segment des berlines compactes, des écarts considérables de performance énergétique existent entre les différentes motorisations qui équipent un même véhicule. *On peut noter que les motorisations les plus modestes permettent encore d'atteindre des vitesses supérieures d'au moins 60 km/h à la vitesse maximale autorisée en France.* Enfin, en termes d'accélération, les moins puissantes permettent tout de même de passer de 0 à 100 km/h en à peine 12 secondes, ce qui est très loin de représenter une gêne pour un conducteur ordinaire.

Généralisation des résultats obtenus sur les voitures compactes

Les comparaisons effectuées sur le segment des véhicules compacts ont illustré l'effet de levier que représente la diminution des performances dynamiques des automobiles pour augmenter, à technologie constante, leur performance énergétique. Pour généraliser ce raisonnement, on peut, à partir des bases de données

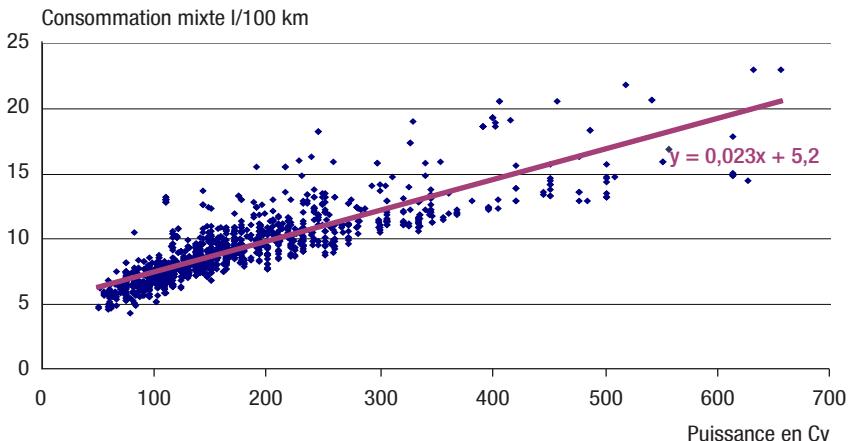
de l'ADEME sur les véhicules commercialisés en France, représenter la relation entre la puissance des véhicules (exprimée en Cv) et leur consommation mixte (exprimée en l/100 km). Les graphiques suivant illustrent cette relation.

❖ **Consommation mixte en fonction de la puissance
Voitures diesel, marché français**



Source : CAS d'après bases de données ADEME

❖ **Consommation mixte en fonction de la puissance
Voitures essence, marché français**



Source : CAS d'après bases de données ADEME

Cette relation met en évidence le lien entre la consommation de carburant (diesel ou essence) et la puissance pour les véhicules du marché français.

Ainsi, on peut constater que toute réduction de 15 Cv de la puissance d'un véhicule (soit entre 10 % et 20 % de la puissance typique d'un véhicule ordinaire) se traduit par un gain d'environ 0,35 l/100 km en consommation mixte (soit un gain de consommation compris entre 4 % et 6 %). Or une réduction de 15 Cv n'est que très peu pénalisante pour un véhicule. Pour s'en convaincre on peut se rappeler que les motorisations qui équipent une Renault Mégane sont comprises entre 100 et 165 Cv, entre 110 et 204 Cv pour une Renault Laguna, entre 95 et 175 Cv pour une Peugeot 308 ou encore entre 110 et 211 Cv pour une Peugeot 407.

Implications des résultats précédents

Ces résultats permettent de quantifier la place que pourrait avoir la réduction des performances, à technologie constante, dans les objectifs de réduction de la consommation énergétique des automobiles.

Sur l'exemple des véhicules compacts, en prenant comme hypothèses une réduction d'environ 30 km/h de la vitesse maximale (par exemple de 200 à 170 km/h pour la moyenne des véhicules compacts) et une augmentation de 3 secondes du temps d'accélération de 0 à 100 km/h (par exemple de 9 à 12 secondes pour la moyenne des véhicules compacts), les gains de consommation seraient compris, en cycle mixte, entre 0,6 et 1,5 l/100 km.

Ainsi, il semble raisonnable de considérer comme atteignable une réduction d'au moins 15 % de la consommation des véhicules, grâce à une réduction des performances dynamiques des véhicules.

3 ■ Des améliorations incrémentales, notamment sur les auxiliaires, peuvent être des sources importantes de réduction de la consommation et des émissions

Des réductions significatives des consommations et des émissions peuvent être obtenues en travaillant un à un tous les postes fonctionnels de base d'un véhicule, autres que ceux relevant de la motorisation ; ces perfectionnements sont d'ailleurs pour la plupart communs à tous types de véhicules quel que soit le mode de propulsion. Ils concernent en premier lieu les caractéristiques structurelles des véhicules (poids, aérodynamisme, frottement des pneumatiques, etc.). Par ailleurs, depuis une trentaine d'années, le contenu fonctionnel

d'une automobile s'est considérablement enrichi avec en corollaire, bien souvent, un accroissement de la masse et de la consommation associée : climatisation, intégration de nombreux dispositifs de sécurité tels que ABS et airbags, automatisation et électrification de nombreuses fonctions, etc.). On citera quelques-uns de ces perfectionnements à titre d'exemple, sans chercher à être exhaustif.

Avant de faire le bilan des réductions de consommation atteignables grâce à une optimisation de tous les consommateurs d'énergie d'un véhicule, il est nécessaire de préciser que tous ces consommateurs ne sont malheureusement *pas pris en compte dans les cycles d'homologation des véhicules*. On peut citer, à titre d'exemple emblématique, le cas de la climatisation dont l'impact sur la consommation n'est pas inclus dans les chiffres officiels, c'est-à-dire lors des tests NEDC. Il s'agit là d'un réel problème, car cela n'incite pas les acteurs de l'industrie automobile à optimiser ce composant.

3.1. L'allègement des véhicules et l'utilisation de nouveaux matériaux

Il existe aujourd'hui un véritable besoin d'allègement des véhicules. L'allègement peut être un des facteurs importants d'amélioration de la performance des véhicules.

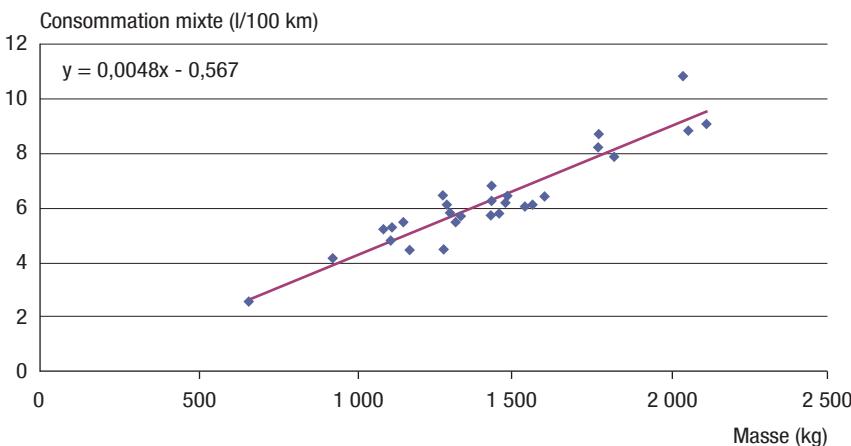
D'une façon générale, un surpoids de 100 kg de masse conduit à une surconsommation d'environ + 0,5 litre/100 km (calculs sur une base de 33 véhicules diesel récents). Le graphique suivant illustre la dépendance entre la consommation des véhicules et leur poids.

La réduction de la masse d'un véhicule peut enclencher un cercle vertueux : elle permet de réduire la taille du moteur et donc de diminuer le poids du véhicule.

Le progrès de la sécurité, souvent invoqué en matière d'alourdissement des véhicules, constitue un facteur important pour expliquer la hausse du poids des véhicules, mais il n'explique pas à lui seul cette hausse. Depuis le milieu des années 1990, la sécurité passive – c'est-à-dire l'ensemble des dispositifs qui permettent de réduire les dommages causés par un accident – a réalisé des progrès extraordinaires. L'indicateur de référence dans l'industrie automobile est celui fourni par l'organisme indépendant EuroNCAP, qui établit depuis plus de dix ans des notations pour les véhicules, ce qui permet de mesurer le rythme des progrès accomplis par l'industrie automobile dans le domaine de la sécurité. À titre d'exemple, il y a dix ans une Renault Clio ou une Peugeot 406 ne recueillaient que 2 étoiles, une Volkswagen Passat 3 étoiles, alors

que désormais les remplaçantes de ces modèles obtiennent toutes la notation maximum qui est de 5 étoiles.

⌚ **Rapport entre masse et consommation**
Panel de 33 véhicules diesel (2003-2006)



Source : CAS d'après données constructeurs

Ces progrès considérables n'ont néanmoins pas été obtenus au détriment uniquement de la masse, car l'industrie automobile a relevé le défi d'une sécurité améliorée en introduisant très rapidement des *matériaux innovants* :

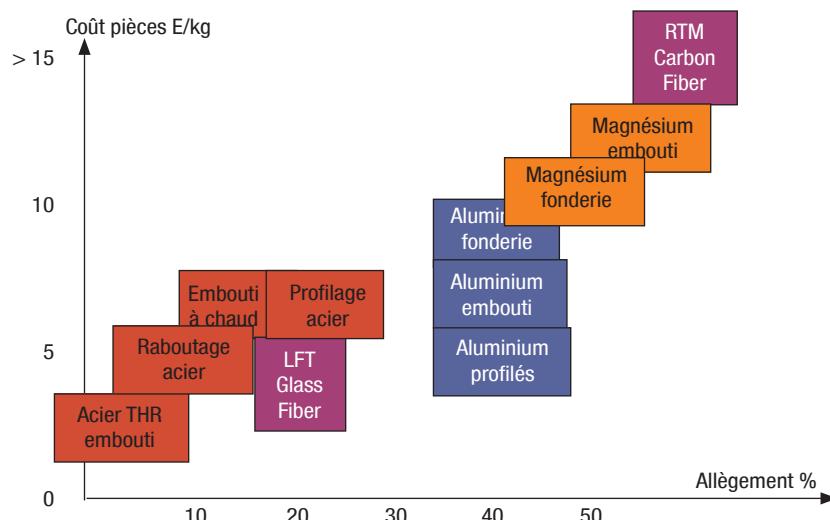
- apparition au début des années 1990 des aciers HLE (haute limite élastique), deux à trois fois plus résistants qu'un acier doux (300 à 500 mégapascals¹ contre 100 à 250 MPa) ;
- apparition à la fin des années 1990 des aciers THLE (très haute limite élastique) qui ont permis un nouveau doublement de la résistance (500 à 800 MPa) et, plus récemment, des aciers UHLE (ultra haute limite élastique) ;
- utilisation du magnésium dans les blocs moteurs.

De plus, le secteur automobile pourra dans les années à venir utiliser de *nouveaux matériaux* qui contribueront à réduire significativement la masse des véhicules. Le graphique suivant, réalisé d'après des données du consortium Super Light Cars, cartographie les possibilités d'allègement dans l'automobile et montre que le rythme d'introduction de l'aluminium, du magnésium ou

[1] La résistance des aciers est donnée en Newton par millimètre carré [N/mm²] ou en mégapascal [MPa].

d'autres matériaux est aujourd'hui largement conditionné par une problématique de coût : plus la tonne de CO₂ évitée sera valorisée et plus rapide sera l'allègement des véhicules.

Coût des pièces par performance d'allègement



Source : Super Light Cars

Super Light Cars est un projet européen de R & D, qui implique 38 entreprises (dont Volkswagen, Fiat, Opel, Renault, Volvo, Porsche, Daimler) et dont le but est de faciliter l'adoption de matériaux capables de réduire la masse des véhicules. Ce consortium a pour objectif de réduire de 30 % la masse des véhicules compacts avec des coûts raisonnables (5 euros/kg épargné).

À l'avenir, l'introduction massive des *matériaux composites*, non encore validée au plan industriel (problèmes des coûts de fabrication, de la reproductivité des caractéristiques, des émanations aux postes de fabrication, du recyclage en fin de vie, etc.) pourra représenter des gains substantiels. La large diffusion que connaissent aujourd'hui les matériaux composites dans de nombreux secteurs industriels pourrait en effet concerner aussi l'automobile.

Mais, encore aujourd'hui, du fait des difficultés persistantes de mise en œuvre, des coûts de transformation pas toujours maîtrisés, de l'émettement des initiatives industrielles et du cloisonnement des actions de recherche et

développement, le travail de ces composites n'est guère partie prenante dans des grandes séries industrielles et ne donne lieu, dans le secteur automobile, qu'à des productions de petites séries à haute valeur ajoutée (Mercedes, Aston Martin, Lotus, Jaguar, etc.) ou à des expérimentations à tirage limité (Mercedes-Unimog). Actuellement, hors pièces diverses d'habillage et de carrosserie non structurales, l'intégration de 10 % de composites dans un véhicule de grande série relève de l'exploit industriel !

L'avenir des composites, activité en pleine évolution, pleine de promesses mais encore en recherche de maturité, passe, pour ce qui concerne le secteur automobile, par la production industriellement fiable de matériaux structuraux à moyennes et hautes performances et à coût maîtrisé, ce qui n'est pas acquis pour des grandes séries.

Ce contexte pose d'abord la question de l'avenir des composites en termes de culture industrielle. Le passage du plastique et surtout du métallique (concurrence de l'aluminium et de certains alliages spéciaux) au composite impose, au sein des PME et de bon nombre de bureaux d'études de grandes entreprises, une remise en cause certaine de beaucoup de schémas de pensée au niveau de la conception et de l'élaboration des produits ou au niveau de l'ingénierie des assemblages complexes.

Les grands donneurs d'ordre ne sont pas, par ailleurs, totalement convaincus de la faisabilité à terme de productions en série utilisant largement de tels matériaux composites, en dépit de la pression exercée par l'évolution de la situation énergétique¹.

Par son caractère très résistant et léger, le composite à renfort fibre de carbone (PRFC, ou « fibre de carbone ») est déjà appliqué dans de nombreux domaines. On peut citer le cas de l'industrie aéronautique, qui correspond certes à la mise en œuvre de systèmes très complexes en petite série : l'Airbus A380 comporte un caisson central (« *wingbox* ») entièrement en composite, 40 % de

[1] Un dirigeant auditionné estime que la contrainte énergétique s'appliquera essentiellement sur deux domaines de R & D (motorisation 3l/100 km et aérodynamisme) et ne croit pas, pour les véhicules de grande série et *a fortiori* « *low cost* », à l'avenir des composites à grande échelle (allègement des structures à sécurité constante) pour des raisons liées à la difficulté de maîtriser techniquement et économiquement les processus de fabrication en grandes séries de véhicules à forte intégration de composites ; les problèmes de recyclage en fin de vie et d'hygiène aux postes de production (émissions de composés organiques volatils, styrènes), actuellement dirimants, peuvent pourtant être résolus si on s'en donne les moyens, comme l'ont fait les États-Unis : captation et traitement des émissions aux moules de formage, mise en poudre des thermodurcissables, recyclage des thermoplastiques au prix d'une dégradation des propriétés, etc.

la structure de l'Airbus A350 sera en composite, près de 80 % du Boeing 787 Dreamliner en masse sont constitués de matériaux composites.

Dans le domaine de l'automobile, ce matériau est jusqu'à présent utilisé majoritairement en compétition (Formule 1, Indy Car). Néanmoins, des constructeurs (par exemple General Motors ou BMW) ont initié l'intégration de fibre de carbone dans certains de leurs modèles (ailes avant, passages de roues sur Chevrolet Corvette Z06, toit des BMW M6, M3, supports de pare-chocs avant et arrière) ; il s'agit cependant de versions sportives produites en petites séries et peu vendues.

Certains constructeurs automobiles commencent à dévoiler des « *concept cars* » qui préfigurent l'utilisation massive de fibre de carbone dans les véhicules de grandes séries. C'est le cas de Toyota, qui a présenté au salon de Tokyo 2007 un véhicule hybride rechargeable (Toyota 1/X) dont la coque est entièrement réalisée en fibre de carbone, et qui ne pèserait que 420 kg, avec un système de propulsion thermique-électrique logé sous les sièges arrière.

En résumé, on peut estimer que la réduction de masse des véhicules est une piste importante de diminution de la consommation des véhicules. De manière prudente, on peut considérer qu'une réduction de 100 kg de la masse de berlines diminuerait leur consommation d'environ 7 %, pour un surcoût au véhicule d'environ 500 euros.

3.2. L'aérodynamisme

Depuis toujours, l'aérodynamique est identifiée comme l'une des principales sources de progrès dans les performances automobiles. En effet, les forces aérodynamiques peuvent représenter jusqu'à 50 % de la résistance des véhicules à l'avancement¹.

La force de résistance aérodynamique F_a dépend de la densité de l'air Q , de la surface frontale S ou maître-couple et du coefficient de traînée C_x , selon la formule :

$$F_a = \frac{1}{2} C_x \cdot S \cdot V^2 \cdot Q$$

[1] Cela dépend de la vitesse : négligeable en comparaison des forces d'inertie en mode urbain, elle devient plus importante que celle consommée par le roulement des pneus sur la chaussée à partir de 90 km/h environ.

LA VOITURE DE DEMAIN : CARBURANTS ET ÉLECTRICITÉ

Ainsi, la puissance absorbée (P_a) croît, elle, avec *le cube de la vitesse* selon la formule :

$$P_a = \frac{1}{2} C_x \cdot S \cdot V^3 \cdot Q$$

La traînée se répartit en traînées interne et externe.

⌚ Les différents constituants de la traînée

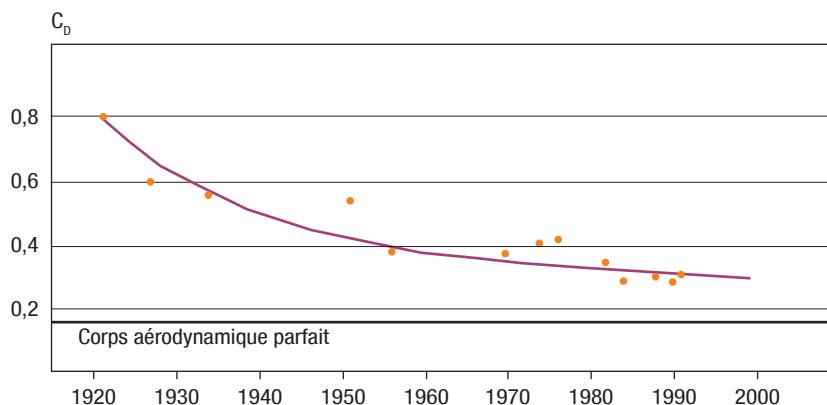
Externe	90 %	Interne	10 %
Traînée de pression	60 %	Traînée de refroidissement	7 %
Traînée de frottement	5 %	Traînée due à la ventilation	3 %
Traînée due aux accessoires	25 %		

Source : CAS

La théorie aérodynamique indique que la voiture « aérodynamiquement » parfaite aurait la forme d'une goutte d'eau, avec un coefficient de traînée de 0,15.

Des progrès considérables ont été réalisés depuis les débuts de l'automobile pour diminuer ce coefficient alors même que les designers imposaient leur style et que le maître-couple aérodynamique se dégradait du fait de l'évolution des largeurs et hauteurs des véhicules :

⌚ Les améliorations de l'aérodynamique au fil du temps



Source : ENS Cachan (Thierry Faure)

Bien que l'on tende vers une asymptote depuis 30 ans, des améliorations significatives (de l'ordre de 4 % ou 5 %) peuvent encore à terme être obtenues par un travail constant de synergie entre les stylistes et les aérodynamiciens. Il semble toutefois difficile de diminuer le C_x jusqu'à 0,2 malgré l'adoption d'éléments issus de l'automobile de compétition tels que le fond plat lisse ou les déflecteurs avant et arrière.

3.3. Les pneumatiques

Du côté des pneumatiques, des progrès sont attendus aussi bien par l'introduction de pneus à bas niveau de frottement que par la généralisation des systèmes permettant de mieux gérer la pression des pneus.

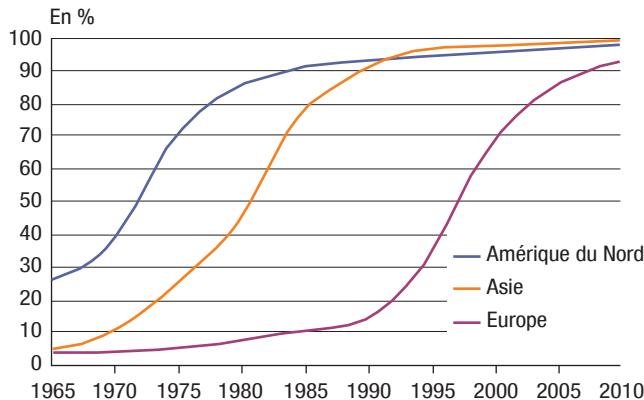
Les pneumatiques à bas niveau de frottement pourraient permettre de réduire d'au moins 3 % la consommation des véhicules. L'enjeu de ce composant est de taille car la résistance au roulement du pneu peut absorber jusqu'à un tiers de l'énergie fournie par le moteur. Ces progrès sont accessibles à très court terme. On peut citer la dernière génération de pneumatiques Michelin « Energy Saver », qui permet de réduire la consommation moyenne de 0,2 l/100 km, soit environ 4 g CO₂/km. Ces pneumatiques ont été récemment commercialisés au lancement de la Peugeot 308. D'autres concepts de pneumatiques innovants sont imaginés, telle l'innovation que le manufacturier américain Goodyear souhaite introduire sur le marché avant 2010. Il s'agit de pneumatiques qui utilisent une substance d'origine végétale (l'amidon de maïs) pour réduire la consommation jusqu'à 5 %, ce qui ferait environ 8 g CO₂/km. Le niveau de réduction de la résistance au roulement pourrait alors atteindre 30 %.

Une économie substantielle de carburant peut être obtenue par ailleurs grâce aux *systèmes de gestion de la pression des pneus*, qui vont se généraliser dans les années à venir. En détectant le gonflage insuffisant des pneumatiques, ces systèmes peuvent permettre de réduire de 3 % la consommation des véhicules (source : Continental) en usage réel, mais pas sur cycle d'homologation (en effet, lorsque les véhicules passent leurs tests d'homologation, leurs pneumatiques sont bien gonflés).

3.4. La climatisation

Depuis les années 1960, les systèmes de climatisation se sont généralisés dans l'automobile. La courbe suivante illustre ce phénomène de basculement, observable successivement en Amérique du Nord, en Asie, puis en Europe.

💡 Taux de pénétration de la climatisation



Source : ADEME

Les climatisations sont depuis longtemps reconnues comme l'un des auxiliaires du véhicule qui contribuent le plus à augmenter la consommation énergétique. Les chiffres suivants montrent qu'en fonction des situations de conduite et du type de motorisation, la surconsommation engendrée par un usage de la climatisation varie entre + 12 % et + 43 %.

💡 Surconsommation due à la climatisation

	Cycle urbain (ECE)	Cycle extra-urbain (EUDC)	Cycle mixte (MVEG)	Surconsommation en l/100 km (entre parenthèses variation en %)	
				Surconsommation en l/100 km (entre parenthèses variation en %)	
Essence (moyenne 10 véhicules)	+ 3,1 (+ 31 %)	+ 0,9 (+ 16 %)	+ 1,7 (+ 23 %)		
Diesel atmosphérique	+ 2,4 (+ 26 %)	+ 0,7 (+ 12 %)	+ 1,3 (+ 19 %)		
Diesel suralimenté (turbo Diesel)	+ 4,0 (+ 43 %)	+ 1,5 (+ 28 %)	+ 2,5 (+ 36 %)		
Ensemble des Diesel (moyenne 10 véhicules)	+ 3,2 (+ 35 %)	+ 1,1 (+ 20 %)	+ 1,9 (+ 27 %)		

T extérieure = 30 °C, T consigne = 20 °C, essai sur cycle NMVEG cf. Dir. 98/69.

Source : ADEME

Pour cette raison, les systèmes de climatisation sont aujourd’hui sur la liste des composants dont le rendement devrait être optimisé en priorité. Ils vont connaître dans la décennie 2010 d’importantes modifications. D’abord sur le plan de la réglementation, car ces systèmes, en plus d’augmenter la consommation, utilisent des fluides sur le point d’être interdits. Ainsi, dès 2011 pour les véhicules déjà homologués, et en 2017 pour tous les nouveaux véhicules, les climatisations utilisant des gaz à effet de serre fluorés seront interdites en Europe. En effet, le potentiel de réchauffement planétaire, qui valorise l’impact d’un gaz à effet de serre fluoré par rapport au CO₂, est supérieur à 150 (ce niveau est calculé en fonction du potentiel de réchauffement sur 100 ans d’un kilogramme d’un gaz donné par rapport à un kilogramme de CO₂). Pour mémoire, le fluide R134a, couramment utilisé, présente un potentiel de 1 300. L’industrie automobile va devoir introduire des fluides innovants. Différents concepts sont à l’étude : on peut citer le cas du CO₂, qui sera limité aux véhicules haut de gamme en raison de son surcoût.

Au-delà de ces mises aux normes, les climatisations pourront bénéficier de l’introduction de composants novateurs allégés, dont un pilotage, grâce à des algorithmes de contrôle optimisés, pourrait permettre d’obtenir une réduction d’environ 3 % de la consommation d’un véhicule.

3.5. Les transmissions et la direction

Parmi les équipements qui se sont largement standardisés dans les véhicules, on trouve *la direction assistée*, qui, si elle améliore le confort de conduite, n’en provoque pas moins un surcroît de consommation. C’est la raison pour laquelle on mentionne ici ce composant, car une amélioration déjà présente sur de nombreux véhicules – notamment sur les petits modèles compacts ou urbains – consiste à passer d’une direction assistée hydraulique à une *direction assistée électrique*, ce qui peut engendrer un gain de consommation sensible (2 % selon Continental).

Concernant *la transmission*, qui est le système transmettant le couple moteur aux roues, différentes améliorations peuvent être apportées aux systèmes actuels. Les transmissions étaient historiquement de deux types : boîtes manuelles (changement au levier de vitesses après débrayage) ou boîtes automatiques. Les boîtes automatiques entraînent généralement un surcroît de consommation, qui peut être évalué à 10 % (par exemple sur la Peugeot 308 1.6VTi, la version automatique a une consommation normalisée en cycle mixte de 7,3 l/100 km contre 6,7 pour la version à boîte manuelle). C’est pourquoi les constructeurs

automobiles et fabricants de transmissions ont, depuis une dizaine d'années, initié la mise sur le marché de transmissions dites *robotisées* ; ces dernières permettent de libérer le conducteur de la pédale d'embrayage et même, dans certains cas, de lui offrir un agrément de conduite similaire à celui obtenu avec une boîte automatique, au moyen d'un double embrayage et tout en limitant la surconsommation de carburant, voire en la réduisant. De l'augmentation du nombre de rapports à leur meilleur étagement, en passant par un déclenchement automatisé des changements de rapports, nombreuses sont les pistes d'améliorations dans le domaine des transmissions.

Les réalisations récemment présentées par Volkswagen constituent un exemple parmi d'autres des progrès à attendre dans ce domaine. Après avoir introduit dès 2003 des boîtes de vitesses robotisées DSG6 à 6 rapports (ce sont des boîtes de vitesses « classiques », à la différence près que les changements de rapports ne nécessitent plus de pédale d'embrayage, car le débrayage est géré directement par la transmission), le constructeur introduit en 2008 une version à 7 rapports, DSG7. Sur un véhicule comme la Golf, équipée d'un moteur 1.4TSI, cette transmission réduit la consommation de 6 % par rapport au même modèle équipé de la transmission à 6 rapports. Cette voie continuera d'être exploitée mais demandera sans doute quelques années : si la DSG6 est démocratisée (il s'en est vendu plus d'un million à fin 2007), la DSG7 est seulement proposée en option, pour 1 700 euros.

Ainsi, aussi bien l'automatisation d'un nombre croissant de rapports que la meilleure gestion du système de transmission (par exemple par l'introduction de gestion électro-hydraulique de la boîte) représentent des voies de progrès substantiels, avec un gain potentiel de consommation estimé à 6 % au minimum. On notera également que l'automatisation de la transmission, outre qu'elle participe au confort du conducteur, constitue un élément déterminant de *sécurité routière*, dans la mesure où elle libère le conducteur de tâches fastidieuses et répétitives en cas de conduite urbaine en circulation dense et lui permet de consacrer plus sereinement son attention aux pièges du trafic.

3.6. L'éclairage

La LED (*Light emitting diode*, pour diode électroluminescente) est un semi-conducteur qui convertit directement le courant électrique en photons, c'est-à-dire en énergie lumineuse. Associée à un réflecteur ou une lentille, cette « mini-ampoule » de 3 à 10 millimètres de diamètre donne une lumière dont la couleur varie selon le type de matériau (phosphure de gallium) utilisé. Le blanc

est obtenu par la juxtaposition de diodes rouges, vertes et bleues, ou bleues et jaunes.

La première voiture au monde commercialisée avec un éclairage de jour à LED à l'avant a été l'Audi A8 W12 6.0 quattro. Depuis, Audi est le seul constructeur « haut de gamme » à proposer des feux de position (ou codes) à LED à l'avant. Cette technologie est présente en série sur les Audi A8, S8 et S6. L'éclairage à LED, bien qu'encore coûteux, permet de mettre la technologie au service de la sécurité, de l'économie d'énergie ou encore de l'esthétique.

En matière de sécurité, grâce à l'allumage quasi immédiat des feux stop (2 à 15 millisecondes contre 150 à 300 ms pour une lampe classique et 500 ms pour une lampe au xénon), le freinage est signalé plus rapidement. Les distances de freinage, à partir du moment où l'on appuie sur le frein, sont donc diminuées (3 mètres à 60 km/h, 6 mètres à 120 km/h). La visibilité est également améliorée : la surface lumineuse des feux de signalisation est plus homogène grâce à la multitude des diodes employées. L'allumage précis des LED améliore l'impact visuel de 5 mètres à 120 km/h.

En matière d'économie, les LED, grâce à leur rendement (80 % de l'énergie électrique est transformée en lumière contre 20 % pour une lampe classique), ont une très faible consommation électrique (10 Watts contre 21 pour un feu stop) ; l'alternateur est moins sollicité, la consommation de carburant réduite.

En matière d'esthétique, les LED, compactes et dégageant moins de chaleur, offrent davantage de liberté aux designers, ce qui permet au véhicule de gagner en caractère et en identité.

Audi, comme Lexus, utilise également la technologie LED pour les feux stop arrière et les feux de position. Les Audi A8 et S8 bénéficient en outre de clignotants à LED à l'arrière.

Les ingénieurs travaillent déjà à de nouvelles applications comme l'aide à la vision nocturne ou à l'affichage tête haute avec l'OLED (*Organic light emitting diode*).

Plusieurs équipementiers automobiles vont proposer ces systèmes d'éclairage dès le début de la décennie 2010 avec des volumes de production plus significatifs que ceux relatifs aux véhicules de niche sur lesquels on retrouve aujourd'hui cet équipement. Grâce à l'introduction de LED, les clignotants, feux de stationnement et phares engendreraient une réduction significative de consommation des véhicules, d'environ 3 %.

3.7. Les autres équipements auxiliaires (sécurité, électronique, électricité...)

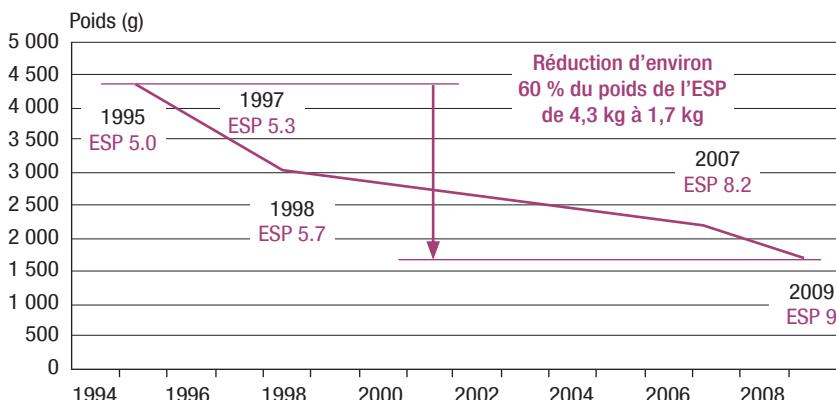
Nombre d'auxiliaires utilisés dans les véhicules modernes font l'objet de progrès constants, que ce soit en matière d'alimentation électrique (alternateurs à haut rendement, etc.), en matière d'électronique embarquée (ordinateurs de bord, électronique de puissance, etc.) ou en matière de sécurité (ceintures de sécurité, airbags, ESP, etc.). Tous ces progrès concourent à diminuer selon les cas les déperditions énergétiques ou le poids des dispositifs.

L'exemple de l'ESP (« *Electronic stability program* » : dispositif électronique de correction de trajectoire) montre l'ampleur des progrès réalisés sur le poids du module électronique embarqué, liés à la miniaturisation et à l'utilisation de matériaux très légers (boîtier) : ainsi, le poids a été réduit de 60 % en moins de 15 ans. D'autres améliorations vont continuer d'accroître les performances pour des poids encore allégés. Cet exemple montre que l'intégration de dispositifs de sécurité ne conduit plus forcément à des alourdissements massifs des véhicules comme cela a pu être le cas pour les modèles sortis dans les années 1980.

Toutes ces améliorations incrémentales peuvent amener des réductions de consommation de l'ordre de 1 % à 2 %.



Évolution du poids du boîtier ESP



Source : Bosch

3.8. Le cas de la Logan Eco2 : illustration d'une stratégie de réduction de la consommation par une série d'optimisations

⌚ Des progrès accessibles à court terme – Le cas Logan Eco2

Des progrès considérables sont ainsi à anticiper pour les véhicules conventionnels. Un exemple récent en a été fourni par Renault, lors du challenge Bibendum Michelin à Shanghai en 2007. Renault a préparé une Logan « Renault Eco2 » expérimentale qui a terminé deuxième au challenge. Grâce à une série d'optimisations et à la technique de son pilote, cette Logan a parcouru les 172,2 km du Challenge en ne consommant que 4,69 litres de gasoil, soit une consommation moyenne de 2,72 l/100 km correspondant à des émissions de 71 g CO₂ au km. Ci-dessous nous avons représenté les performances réalisées par la Logan Eco2 en cycle normalisé (NEDC) et lors du Challenge, tout en comparant cette Logan au modèle série équipé du moteur 1,5DCi :

	1,5DCi (NEDC)	Eco2 (NEDC)	Eco2 (challenge)
Consommation (litre/100 km)	4,9	3,9	2,72
Émissions (g CO ₂ /km)	120	97	71

Pour obtenir ces gains considérables, Renault n'a eu recours qu'à des technologies aujourd'hui matures :

- **Le groupe moto-propulseur : gain de 11 g CO₂/km**
 - À partir de la motorisation 1,5 DCi (85 ch) commercialisée en fin d'année 2007, allongement du rapport de pont de 8 %, réduisant la consommation tout en conservant des reprises compatibles avec un usage courant : gain de 4 g CO₂/km.
 - Application d'un nouveau réglage et d'une nouvelle mise au point pour la combustion avec des injecteurs 7 trous (contre 5 en série) et un bol de piston élargi, offrant une meilleure pulvérisation du carburant et une meilleure répartition lors de la combustion : gain de 5 g CO₂/km.
 - Ajustement de certains jeux de pièces mécaniques et choix d'huiles basse viscosité, pour réduire les frottements internes du moteur, et fluidification de l'huile de boîte de vitesses : gain de 2 g CO₂/km.

- **L'aérodynamisme : gain de 5 g CO₂/km**

Réduction du coefficient de pénétration dans l'air de l'ordre de 20 % en passant d'un C_x de 0,36 (Logan de série) à 0,29 par :

- une lame souple sous le bouclier réduisant les turbulences sous le plancher, associée à un carénage sous la cuve de roue de secours ;
- en face avant, les entrées d'air de la calandre ajustées pour réduire la traînée de refroidissement ;
- des bavettes de roues réduisant les turbulences latérales ;
- un becquet arrière optimisant la traînée globale du véhicule ;
- des générateurs de vortex, petits éléments aérodynamiques placés sur le toit du véhicule permettant, en particulier dans le cas d'un tri-corps, de diriger les flux d'air à l'arrière du véhicule et ainsi de diminuer la traînée d'air ;
- l'assiette de la voiture légèrement abaissée.

- **La liaison au sol : gain de 3 g CO₂/km**

L'objectif dans ce domaine était de réduire les frottements mécaniques générateurs de consommation de carburant par des solutions réalistes.

- La Logan « Renault EC02 Concept » est équipée des nouveaux pneumatiques Michelin Energy Saver 185/65R15 à faible résistance au roulement. Ils apportent un gain de 2 g CO₂/km sur le cycle NEDC (cycle d'homologation).
- Des roulements de train arrière à faibles frottements apportent un gain de l'ordre de 1 g CO₂/km ; le contact pneu/sol est également optimisé par des réglages adéquats.

- **Les auxiliaires consommateurs d'énergie : gain de 4 g CO₂/km**

L'alternateur piloté permet de charger la batterie au juste nécessaire (tension de 12,8 volts au lieu de 13,5 volts). Cela se traduit par une charge moins fréquente et, de ce fait, une moindre consommation d'énergie.

3.9. Bilan sur les auxiliaires de consommation

Compte tenu des diverses améliorations possibles, une réduction de 10 % de la consommation normalisée et de 15 % de la consommation réelle des véhicules est parfaitement envisageable grâce aux progrès sur ces composants.



Réduction potentielle des consommations

Réduction potentielle des consommations du réservoir à la roue	Gain potentiel
Allègement (nouveaux matériaux)	7 %
Aérodynamisme	4 %
Pneumatiques à bas frottement	3 %
Système de contrôle de la pression des pneus	3 %
Système de climatisation	5 %
Direction assistée électrique (par rapport à la direction assistée hydraulique)	2 %
Pompe électro-hydraulique pour boîte de vitesses	2 %
Transmission automatisée	4 % à 6 %
Éclairage (LED)	3 %
Autres (gestion thermique optimisée, sécurité)	5 %

Les gains indiqués sont non cumulatifs et les pourcentages ne doivent pas être additionnés.

Source : CAS

4 ■ Les conducteurs pourront bénéficier d'outils intelligents d'aide à la conduite, pouvant réduire jusqu'à 20 % en moyenne la consommation

4.1. Les économies de carburant liées au bon comportement du conducteur

Dans différentes circonstances et différents contextes, on a pu montrer qu'avec un véhicule donné et un parcours identique, pour une vitesse minimale fixée, un conducteur nerveux peut consommer 40 % de carburant de plus qu'un conducteur expérimenté ayant adopté le mode de conduite le plus économique. En moyenne, l'écart peut être d'environ 20 % entre un conducteur soucieux d'économie et un conducteur moyen. Les méthodes de conduite économique, particulièrement efficaces en ville, sont connues mais peu pratiquées :

- accélérer le plus doucement possible ;

- adopter le rapport boîte de vitesses le plus élevé compatible avec la vitesse recherchée, quitte à disposer d'une marge d'accélération relativement faible et de rétrograder pour accélérer (diminution de consommation et donc d'émissions de CO₂ d'environ 5 %) ;
- anticiper les arrêts à venir, en cessant d'accélérer, pour avoir à freiner le moins possible ;
- conduire à la vitesse la plus constante possible (environ 3 % d'émissions de CO₂ évitées) ;
- éviter autant que possible les encombrements de circulation pour ne pas avoir à faire fonctionner inutilement le moteur, la voiture étant arrêtée (jusqu'à 5 % de gain de consommation)…

D'autres sources d'économie fondées sur le bon sens peuvent être mentionnées :

- ne pas rouler inutilement vite lorsqu'on n'est pas pressé (jusqu'à 10 % de baisse de consommation) ;
- ne pas utiliser le système de climatisation lorsqu'il n'est pas indispensable et l'utiliser pour obtenir la température acceptable la plus élevée (surconsommation comprise entre 12 % et 43 % selon les modèles d'après l'ADEME) ;
- dans le cas de la voiture électrique, utiliser le chauffage de façon similaire ; en hiver, pour des températures extérieures usuelles en France, la température ambiante optimale dans l'habitacle de 19 °C permet d'économiser entre 5 % et 20 % de consommation (selon l'énergie embarquée dédiée au chauffage) par rapport à une température de 22 °C dans l'habitacle ;
- gonfler suffisamment les pneus (approximativement 2 % de diminution de consommation pour un véhicule moyen)…

4.2. Les dispositifs d'aide à la conduite

Il existe désormais sur le marché des voitures équipées d'un dispositif *stop & start* qui coupe le moteur quand la voiture est à l'arrêt et qui le remet en fonctionnement dès que le conducteur lâche la pédale de frein ou actionne l'accélérateur. En ce qui concerne les dispositifs optionnels hors motorisation, des systèmes de guidage disponibles sur le marché (GPS/Inforoutes) indiquent les embouteillages et la façon la plus astucieuse de les éviter.



Le dispositif d'éco-conduite de Continental : une diminution simple et immédiate des émissions de CO₂, comprise entre 5 % et 20 %

Cet appareil électronique calcule pour le conducteur la consommation optimale par la confrontation d'informations provenant, d'une part, d'un système de navigation associé aux informations de trafic et, d'autre part, des paramètres du moteur, mesurés par un ensemble de capteurs. Les informations émises par ces derniers sont transmises au calculateur par un bus CAN (*Controller area network*).

L'intérêt de ce dispositif d'éco-conduite est de fournir en temps réel au conducteur des informations sur une consommation moyennée, et non instantanée comme les indicateurs de consommation d'ores et déjà en série sur les nouveaux véhicules. Par un système d'alerte visuel pertinent, relativement ludique et bien intégré au tableau de bord, le conducteur peut ainsi visualiser les marges de progrès lui restant dans sa consommation de carburant. Cet outil permet d'éduquer les conducteurs à la conduite économe ; une formation pourrait avantageusement être dispensée en auto-école.

Le système en développement nécessite certes encore des améliorations ; disponible au début pour les véhicules plutôt haut de gamme, sa généralisation à l'ensemble des véhicules neufs est tout à fait envisageable à l'horizon 2015, pour peu qu'une réglementation l'impose.

In fine, selon les situations, ce système électronique permet de diminuer entre 5 % et 20 % la consommation de carburant et donc de CO₂.

Ainsi, partant d'une analyse du trajet prévu et des paramètres du véhicule en fonctionnement, des dispositifs peuvent afficher, sur l'écran d'un système de navigation GPS, en particulier le meilleur itinéraire, la vitesse recommandée, le bon rapport de vitesse ainsi que la consommation prévisible en fonction du comportement du conducteur.

Il reste à faire adopter par les constructeurs des dispositifs d'assistance à la conduite qui sont actuellement à l'état de prototypes ou en cours de développement, soit en vue d'inciter les conducteurs à conduire de façon plus économique en les informant en temps réel des conditions de fonctionnement et de roulage, soit en vue de se substituer à eux pour que soient opérées automatiquement les actions d'optimisation de la consommation.



Réduction potentielle des consommations du réservoir à la roue

Réduction potentielle	Gain potentiel moyen
Indicateur de passage de vitesse	2 %
Système de navigation paramétré « éco-conduite »	5 %
Régulateur de vitesse adaptatif	3 %
Mesure permanente de la pression des pneumatiques	3 %

Source : CAS

Un tour de piste des équipementiers montre ainsi que de nombreux dispositifs existent ou sont près d'être commercialisés ou intégrés dans les nouveaux modèles, laissant espérer, pour un conducteur moyen normalement attentif aux consignes de bon sens en matière de conduite, un potentiel d'économie de carburant de l'ordre de 20 %.

Annexe 4



Synthèse d'une mission effectuée en Chine et au Japon en novembre 2010

Cette mission a été menée par un des rapporteurs du groupe, conjointement avec des représentants d'entreprises. Ce compte-rendu se fonde sur l'observation des installations visitées et sur les propos des interlocuteurs rencontrés.

1 ■ Mission en Chine

1.1. Un plan Véhicule électrique pour s'affranchir de la dépendance pétrolière

La raison régulièrement invoquée par les Chinois pour justifier leur plan quinquennal de développement du VE est l'inquiétude concernant leur approvisionnement futur en pétrole. La pollution urbaine est également citée – moins souvent – mais il semble hors de question pour le gouvernement, dont on dit qu'il en a le pouvoir, d'imposer de fortes restrictions à la circulation des véhicules thermiques dans les grandes agglomérations comme Pékin, qui supportent le plus de nuisances. La volonté de réduire les émissions de CO₂ n'est quasiment jamais évoquée, la production d'électricité chinoise étant extrêmement carbonée. L'objectif visé est qu'un million de VE circulent sur les routes de Chine avant 2015. Les VE ne sont pas un produit innovant et la technologie locale est assez avancée pour que cet objectif soit atteint. Un standard devra s'imposer tôt ou tard mais l'heure est à l'initiative privée et à l'expérimentation. L'opérateur principal du réseau électrique national, State Grid, est mis à contribution pour déployer les infrastructures de recharge, au sens large, c'est-à-dire incluant la location, la gestion et la recharge des batteries.

1.2. L'État encourage le développement de petits VE populaires, très économiques et de fabrication locale

Ne disposant pas réellement d'industrie automobile en propre, les Chinois sont plus libres de se lancer dès le départ vers une nouvelle technologie. Le gouvernement a demandé à de nombreux constructeurs de concevoir un petit véhicule électrique populaire, dont le prix ne doit pas excéder 3 000 euros. Le principe est de « laisser pousser l'herbe » pour sélectionner ensuite les meilleurs projets. Les modèles sont nombreux et la plupart affichent des performances très limitées : vitesse maximum de 50 km/h, autonomie de 50 à 100 km, confort spartiate. Ils se conduisent souvent sans permis, mais n'ont pas le droit de circuler sur autoroute ni sur les grands axes des agglomérations les plus importantes. Ces VE pourraient donc convenir aux résidents des petites villes, pour une utilisation locale. Le système de recharges rapides ou « *quick drop* » serait développé par State Grid, tandis que les pouvoirs publics locaux misent sur l'initiative individuelle pour organiser les recharges lentes (sur une prise standard, voir photo).



Source : CAS

Par ailleurs, ces véhicules ne sont pas subventionnés, contrairement aux VE « routiers » pour lesquels les primes et déductions d'impôt à l'achat peuvent dépasser 12 000 euros. Il est difficile de dire si ce modèle est pertinent et si la clientèle populaire chinoise est prête à passer du deux-roues électrique à ce type de véhicules dès qu'elle en aura les moyens financiers. Les goûts de la population aisée sont mieux connus : elle a un tropisme fort vers les berlines occidentales de grosse cylindrée, notamment allemandes. Le prix de l'essence est maintenu à un niveau relativement bas (environ 0,80 euro/l) et le gouvernement n'a pas manifesté la volonté de l'augmenter, ce qui rend moins pertinent économiquement le passage à l'électricité pour la traction automobile.

1.3. Les batteries au plomb ont encore un bel avenir en Chine, pour les petits VE mais aussi pour les deux-roues électriques

Pour ces petits VE destinés au marché intérieur, ce sont les batteries au plomb-acide qui s'imposent, en raison de leur coût peu élevé mais aussi parce qu'elles sont d'un usage familier. De façon très surprenante, dans ce pays qui est de loin le plus gros fabricant mondial de batteries au lithium-ion, ce sont également des batteries au plomb qui équipent l'incroyable « armada » des deux-roues électriques (20 millions mis en circulation chaque année).

Les entreprises incitées à développer des petits VE ont en général pour activité première la fabrication de véhicules industriels ou agricoles. Mais certaines sont des constructeurs de deux-roues électriques. Une d'entre elles, qui produit chaque année 600 000 vélos électriques destinés à l'exportation, offrait lors de notre visite l'image d'une ruche bourdonnante. Par contraste, la petite extension dédiée à la production de véhicules électriques semblait tourner au ralenti.

Par ailleurs, les plus grandes craintes se font sentir sur la réalité du recyclage des batteries au plomb, qui n'existerait que sur le papier.

1.4. Le plan chinois incite à développer les capacités de fabrication des batteries Li-ion, mais qui semblent destinées à l'exportation

Le plan chinois consacre tout un volet à la fabrication de batteries Li-ion, pour des usages qui ne sont pas clairement définis, vraisemblablement l'exportation. Leur avantage compétitif ne semble pas assuré, car les processus de fabrication sont extrêmement automatisés et utilisent peu de main-d'œuvre. Les composants essentiels (électrolyte, séparateurs) proviennent exclusivement des États-Unis et du Japon qui gardent la maîtrise de la technologie. L'usine ultramoderne de Yintong près de Shenzhen, dans la zone économique spéciale du sud de la Chine, procure une impression étrange. Construite en 2009 avec des fonds provenant de sociétés immobilières et utilisant des brevets américains, composée de quatre bâtiments longs de 400 mètres chacun et équipée des chaînes de montage les plus récentes, elle semblait complètement à l'arrêt. Les quelques commandes passées à l'usine provenaient de State Grid pour des usages stationnaires (intégration au réseau) dont la rentabilité ne paraissait pas évidente.

BYD, le plus grand fabricant mondial de batteries pour portables, devenu constructeur automobile, est la seule entreprise en capacité de commercialiser un VE de type berline occidentale, la E6. Mais BYD peine à le mettre sur

le marché. Selon des observateurs japonais, il existerait un taux de batteries défectueuses significatif à la fabrication. L'entreprise n'a pas la possibilité de les tester, ce qui rend leur intégration dans le VE problématique et expliquerait l'insuccès des quelques taxis électriques E6 de Shanghai.

1.5. Le succès du plan VE chinois est loin d'être assuré

Il y a quelques années, l'État chinois avait lancé un plan de 100 milliards de dollars afin de développer le CTL (*coal to liquid*), autre alternative au pétrole pour alimenter la traction automobile. Ce plan s'est heurté à de nombreux obstacles (environnement, accès à des ressources en eau suffisantes) et ne semble pas aujourd'hui avoir le succès espéré. Certains experts en politique énergétique chinoise laissent entendre que le développement du VE – deuxième réponse à la question de la dépendance pétrolière – pourrait connaître le même sort. Les problèmes sont en effet nombreux, notamment pour le déploiement des infrastructures de recharge. Il n'est pas sûr non plus que les modèles de VE très économiques trouvent acheteurs, et la politique qui a permis de bannir les deux-roues à moteur thermique des grandes villes pour les remplacer par des équivalents électriques n'est pas transposable à l'automobile.



L'étonnant développement du vélo électrique en Chine peut avoir des conséquences inattendues sur la mobilité électrique urbaine

La Chine communique intensivement sur sa volonté de voir se développer le véhicule électrique mais pour l'heure, ce sont surtout les vélos électriques (« EB » pour *electric bike*) qui sillonnent aujourd'hui ses villes. Il en existerait d'ores et déjà 120 millions, et le pays en construit 20 millions par an. Ce phénomène étonnant a des causes qui ont déjà été analysées¹. Les deux principales sont le bannissement par de nombreuses municipalités² des deux-roues à moteur thermique, en raison de l'importante pollution qu'ils occasionnent, et la déficience récurrente des transports en commun, interdisant de fait toute mobilité à une large part de la population.

Techniquement, l'EB profite de la modularité de ses batteries, amovibles et aisément rechargeables au domicile ou ailleurs. Son autonomie d'environ 30 km est parfaitement adaptée à ce mode de transport et le recours possible

[1] Voir par exemple Weinert J. et al. (2008), « The future of electric two-wheelers and electric vehicles in China », *Energy Policy*, 36(7), p. 2544-2555.

[2] En France, les deux-roues motorisés ne sont pas soumis au contrôle technique de pollution.

au pédalage annule l'angoisse de la « panne sèche ». Son prix d'achat reste relativement limité (moins de 250 dollars en Chine pour un modèle à batteries Li-ion) et son fonctionnement est extrêmement économique, sa consommation étant inférieure à 1,2 kWh pour 100 km, soit moins de 1,50 euro pour 1 000 km parcourus (au prix français de l'électricité, inférieur en Chine). Les deux-roues (en général) s'adaptent bien aux villes d'aujourd'hui, car au-delà de la pollution locale engendrée par la combustion des carburants, ils sont une réponse à la raréfaction de l'espace public et aux congestions de trafic ou de stationnement qui en résultent.

En France, les péripéties du dernier Tour de France, au cours duquel un coureur a été soupçonné d'avoir dissimulé un système d'assistance électrique dans le cadre de son vélo, ont montré à quel niveau de miniaturisation était arrivée la technologie.

L'achat d'un EB est le signe d'une élévation sociale pour des Chinois qui pratiquent essentiellement la marche à pied ou le vélo – ces deux modes de déplacement concernant encore près de 90 % de la population. Même si les sondages indiquent que les deux-roues motorisés, de préférence de grosse cylindrée, restent le rêve de nombreux Chinois, cet impressionnant développement de l'EB montre que l'électricité peut emprunter des voies imprévues dans le domaine de la mobilité. Il s'est accompagné de l'essor d'une industrie originale, avec de nombreux constructeurs fabriquant des composants modulaires.

Dans le prolongement de ces EB se développent en Chine des tricycles électriques, voire des quadricycles et, dans les pays développés, certains constructeurs commencent à réfléchir à des ULV (*ultra light vehicles*) adaptés à la traction électrique et aux déplacements urbains (voir photo).



Source : CAS

La plupart des véhicules à moteur thermique actuels, généralement la berline familiale, restent multi-usages et sont conçus aussi bien pour la circulation en ville que pour les trajets routiers. En raison de son autonomie encore réduite, le véhicule électrique sera cantonné dans un certain périmètre de circulation, ce qui jette un doute sur la pertinence d'un modèle qui consisterait simplement à prolonger le véhicule thermique « à tout faire » d'aujourd'hui par son équivalent électrique. L'arrivée massive de l'électricité dans les transports s'accompagnera vraisemblablement d'une reconfiguration du paysage de la mobilité, encore difficile à imaginer, mais peut-être articulé autour de liaisons rapides entre centres urbains, complétés par des moyens de déplacement légers et locaux.

2 ■ Mission au Japon

2.1. Un plan VE qui ressemble étonnamment au plan français, avec pour but de diminuer la dépendance pétrolière, mais aussi les émissions de CO₂

Le Japon invoque les mêmes raisons que la Chine pour justifier son plan en faveur des nouveaux véhicules : risques sur les approvisionnements pétroliers, pollution locale, mais aussi lutte contre les émissions de CO₂. Le plan du METI (ministère de l'Économie, du Commerce et de l'Industrie) ressemble de façon étonnante au plan français, avec un volet R & D sur les batteries, la fabrication et la commercialisation de VE par les constructeurs locaux soutenue par d'importantes subventions à l'achat (jusqu'à 10 000 euros selon les régions), la standardisation des équipements de recharge et la mise en place d'infrastructures en commençant par des villes-démonstratrices.

2.2. La Nissan Leaf est le seul VE pur qui pourrait avoir un certain succès, mais de portée limitée

La Nissan Leaf est présentée comme le premier VE qui peut être vendu en série (elle est jugée bien supérieure à l'i-Miev de Mitsubishi). Sa vente a commencé en décembre 2010, et Nissan aurait déjà enregistré 6 000 précommandes au Japon et 20 000 aux États-Unis. Le projet est très structuré, le constructeur se chargeant par exemple d'installer les prises de recharge chez les clients ou proposant divers types de contrats de location. En cas d'achat, le modèle reste toutefois d'un prix très élevé, et l'électricité au Japon étant plus de deux fois plus chère qu'en France, sa rentabilisation n'est pas acquise. Autonomie

réduite, manque actuel d'infrastructures de recharge font également dire à plusieurs observateurs – à commencer par un représentant de Nissan – qu'ils doutent de son succès commercial, même si les Japonais sont connus pour leur goût de la nouveauté et des objets technologiques.

2.3. Le véhicule hybride toujours nettement en tête des ventes au Japon, soutenu par de fortes subventions

La Prius de Toyota est de très loin la première voiture vendue au Japon, sans que l'on sache s'il faut attribuer ce succès à ses vertus environnementales ou aux subventions très élevées dont elle bénéficie. En revanche, pour des raisons mal cernées, Toyota se montre extrêmement prudent avant la mise sur le marché de la Prius PHEV (hybride rechargeable), la date avancée étant fin 2012. En particulier, le surcoût par rapport à la Prius hybride actuelle, dont dépend la rentabilité de ce type de véhicules, reste indéterminé. Voulant éviter toute nouvelle contre-performance, le constructeur se laisse le temps de tester les batteries Li-ion qui vont équiper des Toyota pour la première fois, les batteries NiMH qui équipent la Prius VH étant inadaptées à l'usage en VHR.

Si d'autres constructeurs se lancent dans la fabrication de modèles hybrides (Honda par exemple), certains chercheurs parient sur une plus grande simplicité, avec une unique motorisation électrique, le moteur thermique n'étant là que pour recharger la batterie (« *range extender* », comme pour la Chevrolet Volt).

2.4. Le marché des deux-roues électriques se développe et révèle un début de principe de spécialité dans la fabrication des composants qui pourrait s'étendre au VE

Si le marché des deux-roues électriques au Japon n'a rien à voir avec son homologue chinois, il est en pleine expansion et des constructeurs comme Yamaha ou Sanyo veulent en faire un vecteur de croissance, y compris à l'exportation. L'Europe est visée en premier pour des raisons bien connues : congestion urbaine, vieillissement des populations, tropisme vers les modes de déplacement « doux ». Les marchés néerlandais et allemand vivent une véritable explosion qui devrait s'étendre aux pays voisins.

Shimano, pratiquement l'unique fournisseur mondial d'équipements pour vélos, s'est lancé dans la production de roues de vélo avec moteur incorporé et dans la vente de batteries modulaires (pouvant se loger sous le porte-bagages ou le long du cadre). Ce principe de spécialité pourrait s'étendre au VE, si les

projets de développement de « *in-wheel-motors* » aboutissent, le but de certains chercheurs étant de pouvoir facilement convertir n'importe quel véhicule classique en VE. En cas de succès, la construction de VE pourrait s'en trouver bouleversée.

2.5. Des batteries fabriquées au Japon mais dont le coût de production ne semble pas devoir nettement diminuer dans les dix prochaines années

Les batteries pour vélos ont un coût de production par unité de capacité (Wh) 2,5 fois moins élevé que celles pour VE, à technologie identique (Li-ion FePO₄). La raison semble provenir de conditions de fabrication moins draconiennes pour les batteries de vélos. Les coûts de production sont composés pour 75 % des coûts des matières premières, et la grande majorité des interlocuteurs, y compris ceux du METI, ne voient pas le prix des cellules (pour VE) descendre au-dessous de 300 à 400 euros/kWh, soit la valeur maximale admissible pour que les VE puissent accéder à une certaine rentabilité économique. Certains experts vont jusqu'à dire qu'il faut attendre la prochaine génération de batteries (métal-air) pour que le VE soit rentable à grande échelle, mais cette technologie relève encore de la recherche fondamentale.

Annexe 5

Liste des personnes auditionnées

Parlement

Sénat

Louis NÈGRE, sénateur des Alpes-Maritimes, chargé par le Gouvernement d'une mission sur le déploiement des infrastructures de recharge publique des véhicules électriques.

Administrations et organismes publics

Secrétariat général du Gouvernement (Premier ministre)

Henri SERRES, président du comité de pilotage interministériel des systèmes d'information

Direction générale de la compétitivité, de l'industrie et des services (DGCIS, ministère de l'Économie, des Finances et de l'Industrie)

Luc ROUSSEAU, directeur général

Romain BEAUME, chef du bureau des politiques d'innovation et de technologies, service de la compétitivité et du développement des PME (SCDPME)

Emmanuel CLAUSE, chargé de mission « recherche / transports », SCDPME

Vincent SUSPLUGAS, chef du bureau de la politique des pôles de compétitivité, SCDPME

LA VOITURE DE DEMAIN : CARBURANTS ET ÉLECTRICITÉ

Direction générale de l'énergie et du climat (DGEC, ministère de l'Énergie, de l'Énergie, du Développement durable et de la Mer)

Jean-Louis LEGRAND, coordinateur interministériel du plan « véhicules décarbonés »

Daniel KOPACZEWSKI, sous-directeur de la sécurité et des émissions des véhicules

Direction générale pour la recherche et l'innovation (DGRI, ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche)

Ronan STÉPHAN, directeur général

Bruno LAROUSSE, chargé de mission NTE, « énergie, développement durable, chimie et procédés », service stratégie de la recherche et de l'innovation

Bureau de recherches géologiques et minières (BRGM)

Patrice CHRISTMANN, responsable de la division « Stratégie des ressources minérales », direction de la stratégie

Centre national de la recherche scientifique (CNRS)

Jean-Marie TARASCON, professeur, Laboratoire de réactivité et de chimie des solides (LRCS), CNRS/université de Picardie Jules-Verne, Amiens

Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA)

Jean THERME, directeur de la recherche technologique, directeur du CEA Grenoble, membre de l'Académie des technologies

École nationale supérieure des mines de Paris - ParisTech

Julien ASSOUN, ingénieur-élève des mines

Elias ZGHEIB, docteur en énergétique, Centre énergétique et procédés

Institut français du pétrole et des énergies nouvelles (IFP-énergies nouvelles)

Olivier APPERT, président

Philippe PINCHON, directeur du centre de résultats « Transports »

Valérie SAUVANT, chef du département « électrochimie et matériaux », direction « chimie et physico-chimie appliquées »

Constructeurs automobiles

BMW France

Jean-Michel CAVRET, directeur de la stratégie électro-mobilité

Bolloré

Vincent BOLLORÉ, président-directeur général

Nissan (Europe de l'Ouest)

Bénédicte BOHBOT, coordinatrice projets « zéro émission » - Nissan West Europe SAS

Nicolas BOZEK, chef de l'unité « Zero emission business »

Pierre MACHOEL, chef de produit LEAF

PSA-Peugeot-Citroën

Thérèse MARTINET, directrice des relations institutionnelles

Joseph BERETTA, direction des relations institutionnelles (Énergies, technologies et émissions automobiles)

Marc TISON, directeur des projets véhicules électriques

Alain DUGAST, maître expert en production et stockage d'énergie électrique

Renault

Patrick PELATA, directeur général délégué aux opérations

Thierry KOSKAS, directeur du projet véhicule électrique

Jérôme PERRIN, directeur des projets avancés « CO₂ - Environnement » Technocentre

Tesla Motors France

Simon ROCHEFORT, directeur du marketing

Toyota Europe

Michel GARDEL, vice-président, en charge des affaires extérieures et environnementales

Rody El CHAMMAS, chargé de mission

Volkswagen France

Marie-Christine CAUBET, présidente du directoire

Équipementiers

Bosch

Stéphane EVANNO, responsable véhicule électrique

E4V

Denis GOUNOD, président fondateur

Saft

Richard DOISNEAU, directeur groupe technique

Jean-Michel DURAND, directeur de la stratégie et du développement

Anne de GUIBERT, directeur de la recherche

Schneider Electric

Philippe DELORME, directeur général de la stratégie et de l'innovation

Claude RICAUD, senior vice-president Power innovation

Valeo

Pascal COLOMBANI, président du conseil d'administration

Jacques ASCHENBROICH, directeur général du groupe

Guillaume DEVAUCHELLE, directeur R & D

Thomas PENN, directeur du marketing

Henri TRINTIGNAC, directeur des véhicules électriques et hybrides

Klaus WITTMANN, directeur du développement

Bureaux d'étude

Roland Berger

Max BLANCHET, senior partner

Denis DEPOUX, chargé d'affaires, secteur automobile

Entreprises de fourniture d'énergie et de services

Better Place

Christian EGENFELDT, responsable du développement européen
Jérôme RISCHARD, directeur des alliances du secteur automobile

Électricité de France (EDF)

Jean-Paul BOUTTES, directeur de la stratégie, de la prospective et des relations internationales
Igor CZERNY, directeur des transports et des véhicules électriques
Bernard DELPECH, directeur délégué
Gilles FURET, chargé de mission, direction « transports et véhicules électriques »
Jean-Michel TROCHET, économiste, direction « prospective et relations internationales »

Électricité réseau distribution de France (ERdF)

Gilles BERNARD, directeur des activités nouvelles

Modulowatt

Alain BERNARD, président fondateur de Modulowatt Ingénierie
Claude SATINET, président de Modulowatt Association

Utilisateurs et opérateurs de mobilité

La Poste

Sylvain FRESNAULT, directeur des achats du courrier

Syndicat Mixte Autolib'

Sylvain MARTY, directeur

Vulog

Georges GALLAIS, directeur général

Personnalité qualifiée

Jean-Baptiste MICHEL, ingénieur automobile



Le rapport

*La voiture de demain :
carburants et électricité*
est une publication
du Centre d'analyse stratégique

Directeur de la publication :
Vincent Chriqui, directeur général

Directeur de la rédaction :
Pierre-François Mourier,
directeur général adjoint

Secrétariat de rédaction :
Olivier de Broca

Création : Christine Mahoudiaux

Crédits photos :

Couverture : Fotolia

Page 3 : Thierry Marro
(Centre d'analyse stratégique)

Réalisation : COM&O

Impression :

Imprimé en France

Df : 5RD27600

ISBN : 978-2-11-008738-6
© Direction de l'information légale
et administrative - Paris 2011

Diffusion :
Direction de l'information légale
et administrative
La documentation Française

Contact presse :

Jean-Michel Rouillé,
responsable de la Communication
01 42 75 61 37 / 06 46 55 38 38
jean-michel.rouille@strategie.gouv.fr

www.strategie.gouv.fr

« En application de la loi du 11 mars 1957 (art. 41) et du code de la propriété intellectuelle du 1^{er} juillet 1992, complétés par la loi du 3 janvier 1995, toute reproduction partielle ou totale à usage collectif de la présente publication est strictement interdite sans autorisation expresse de l'éditeur. Il est rappelé à cet égard que l'usage abusif et collectif de la photocopie met en danger l'équilibre économique des circuits du livre.»

