



MUTATIONS ÉCONOMIQUES DANS LE DOMAINE AUTOMOBILE

2 : Technologies et prestations produit

AVRIL 2010



2 : Technologies et prestations produit



Pôle interministériel de prospective et d'anticipation
des mutations économiques



direction générale de la compétitivité
de l'industrie et des services



Délégation interministérielle
à l'aménagement du territoire
et à l'attractivité régionale

Le pôle interministériel de prospective et d'anticipation des mutations économiques (PIPAME) a pour objectif de construire, en coordonnant l'action des départements ministériels, un éclairage de l'évolution des principaux acteurs et secteurs économiques en mutation, en s'attachant à faire ressortir les menaces et les opportunités pour les entreprises, l'emploi et les territoires.

Des changements majeurs, issus de la mondialisation de l'économie et des préoccupations montantes comme celles liées au développement durable, déterminent pour le long terme la compétitivité et l'emploi, et affectent en profondeur le comportement des entreprises. Face à ces changements, dont certains sont porteurs d'inflexions fortes ou de ruptures, il est nécessaire de renforcer les capacités de veille et d'anticipation des différents acteurs de ces changements : l'État, notamment au niveau interministériel, les acteurs socio-économiques et le tissu d'entreprises, notamment les PME.

Dans ce contexte, le PIPAME favorise les convergences entre les éléments microéconomiques et les modalités d'action de l'État. C'est exactement là que se situe en premier l'action du PIPAME : offrir des diagnostics, des outils d'animation et de création de valeur aux acteurs économiques, grandes entreprises et réseaux de PME / PMI, avec pour objectif principal le développement d'emplois à haute valeur ajoutée sur le territoire national.

Le secrétariat général du PIPAME est assuré par la sous-direction de la prospective, des études économiques et de l'évaluation (P3E) de la direction générale de la compétitivité, de l'industrie et des services (DGCIS).

Les départements ministériels participant au PIPAME sont :

- le Ministère de l'Économie, de l'Industrie et de l'Emploi / direction générale de la compétitivité, de l'industrie et des services et direction générale de l'emploi et de la formation professionnelle
- le Ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement durable et de la Mer / direction générale des infrastructures, des transports et de la mer et direction générale de l'aviation civile
- Le Ministère de l'Espace rural et de l'Aménagement du territoire / délégation interministérielle à l'aménagement et à la compétitivité des territoires
- Le Ministère de l'Alimentation, de l'Agriculture et de la Pêche
- Le Ministère de la Défense / délégation générale pour l'armement
- Le Ministère de la Santé et des Sports
- Premier Ministre, Conseil d'analyse stratégique (CAS)

SOMMAIRE

SYNTHÈSE.....	7
1. B1 – ÉLECTRIFICATION DES FONCTIONS	9
1.1. Définition de la variable	9
1.2. Indicateurs pertinents.....	9
1.3. Synthèse des évolutions passées et conséquences pour la filière automobile	9
1.4. Rétrospective	9
1.4.1. L'émergence du multiplexage	11
1.4.2. L'offre de fonctions électrifiées	11
1.4.3. Consommation électrique et rendement électrique du véhicule.....	12
1.5. Trajectoires futures possibles	14
1.6. Annexes : indicateurs et perspectives.....	14
1.6.1. Offre technologique (multiplexage, fonctions du véhicule).....	14
1.6.2. Part des composants électroniques	15
1.6.3. Consommation électrique des véhicules.....	15
1.7. Bibliographie	15
2. B2 – VEHICULE INTELLIGENT ET SECURITE ACTIVE.....	17
2.1. Définition.....	17
2.2. Indicateurs pertinents.....	17
2.3. Synthèse des évolutions passées et conséquences pour la filière automobile	17
2.4. Rétrospective	18
2.4.1. Nombre de capteurs équipant les automobiles	19
2.4.2. Prestations d'aide à la conduite	20
2.4.3. Alarmes et informations fournies par l'automobile.....	21
2.4.4. Interface homme/machine	22
2.5. Trajectoires futures possibles	23
2.6. Annexes : indicateurs et perspectives.....	23
2.6.1. Dépenses de R&D « logiciels ».....	23
2.6.2. Critères technologiques (nombre de capteurs, prestations d'aide à la conduite, alarmes et informations fournies par l'automobile, interface homme/machine)	24
2.7. Bibliographie	24
3. B3 – ALLEGEMENT DES VEHICULES	25
3.1. Définition.....	25
3.2. Indicateurs pertinents.....	25
3.3. Synthèse des évolutions passées et conséquences pour la filière automobile	25
3.4. Rétrospective	25
3.4.1. Évolution de la masse des véhicules.....	25
3.4.2. Utilisation de nanomatériaux dans la composition des matériaux synthétiques.....	29
3.4.3. Impact économique des nanotechnologies en 2010.....	30
3.4.4. Thèmes de recherche actuellement développés.....	31
3.4.5. Voies techniques utilisées sur les véhicules ou concepts cars les plus légers	32
3.5. Trajectoires futures possibles	33
3.6. Annexes : indicateurs et perspectives.....	33
3.6.1. Évolution des indicateurs de masse et de puissance des véhicules	33
3.6.2. Évolution du niveau de gamme des véhicules.....	34
3.6.3. Degré de pénétration des nanomatériaux dans la structure automobile	34
3.6.4. Degré d'implication des concepts cars dans le processus d'allègement	34

3.7. Bibliographie	34
4. B4 – MOTORISATION HYBRIDE ET ELECTRIQUE ET CONSOMMATION	37
4.1. Définition de la variable	37
4.2. Indicateurs pertinents.....	37
4.3. Synthèse des évolutions passées et conséquences pour la filière automobile	37
4.4. Rétrospective	37
4.4.1. L'émergence de la problématique des véhicules hybrides et électriques	37
4.4.2. Les véhicules hybrides.....	39
4.4.3. Les véhicules hybrides rechargeables.....	40
4.4.4. Les véhicules à technologie hydrogène	40
4.4.5. Offre actuelle et future de véhicules hybrides, plug-in et électriques	40
4.5. Trajectoires futures possibles	43
4.6. Annexes : indicateurs et perspectives.....	44
4.6.1. Offre de motorisation dans le monde et consommation	44
4.6.2. Offre de véhicules intégrant un processus électrique	44
4.7. Bibliographie	45
5. B5 – STOCKAGE ET RECHARGE ELECTRIQUE	47
5.1. Définition de la variable	47
5.2. Indicateurs pertinents.....	47
5.3. Synthèse des évolutions passées et conséquences pour la filière automobile	47
5.4. Rétrospective	47
5.4.1. Une offre variée plus ou moins développée	47
5.4.2. Un intérêt plus marqué pour deux technologies plus particulières : les batteries lithium-ion et la ressource hydrogène	49
5.4.3. Le modèle économique de Better Place comme première amorce crédible vers le tout électrique	52
5.5. Trajectoires futures possibles	52
5.6. Annexes : indicateurs et perspectives.....	53
5.6.1. Offre technologique de batteries.....	53
5.6.2. Développement des batteries lithium-ion	53
5.6.3. Développement des modèles d'affaires liés à la mutation technologique.....	53
5.7. Bibliographie	54
Liste des tableaux	55
Liste des graphiques	57

SYNTHÈSE

Cette série de variables B relatives aux technologies et prestations produit traite des évolutions technologiques des produits de la filière à l'échelle du monde.

Les variables analysées dans ce document sont :

B1 : Électrification des fonctions

B2 : Véhicule intelligent et sécurité active

B3 : Allègement des véhicules

B4 : Motorisation hybride et électrique et consommation

B5 : Stockage et recharge électrique

La consommation des véhicules thermiques n'est pas évoquée dans ce chapitre car elle dépendra de l'évolution des prestations électrifiées dans le véhicule (B1), de l'allègement des véhicules (B3), de la réglementation sur les émissions (C1) et de celle sur la vitesse ou la puissance (C2). Elle résultera donc des hypothèses choisies sur ces variables.

L'apparition d'une pile à combustible de traction, tout en étant possible, apparaît secondaire à l'horizon de 10 ans car elle nécessite soit de disposer d'une alimentation en hydrogène dont la fabrication industrielle à partir d'une autre source que le gaz naturel prendra plus de 10 ans ; soit un reformage pour fabriquer l'hydrogène à bord à partir d'essence ou de méthanol. Cette voie implique la présence d'un réformeur à bord et émet du dioxyde de carbone (au prorata du ratio C/H de l'essence ou du méthanol). La complexité d'un tel dispositif serait réservée à une niche de très haut de gamme. Par ailleurs, les piles à combustible posent encore des problèmes de fiabilité et de compacité qu'il faudra surmonter pour pouvoir en équiper les automobiles.

Déclinaison des scénarios prospectifs

Dans le **scénario 1 « Au fil de l'eau »** les contraintes de pouvoir d'achat des ménages dominant.

Le coût de la mobilité, avec la hausse des prix des carburants et des services d'entretien, de réparation et de maintenance, devient prohibitif et amène les ménages à arbitrer en faveur d'autres moyens de déplacement ou à modifier leurs comportements, et donc à restreindre les montants alloués à l'achat de véhicules et/ou l'utilisation de l'automobile.

De ce fait les constructeurs et équipementiers sont incités à beaucoup de prudence sur la diffusion des innovations à grande échelle et on assiste à une pénétration « au fil de l'eau » des nouvelles technologies dans le parc automobile.

Scénario 2 : Innovation « push », marchés pluriels

Les pouvoirs publics soutiennent les initiatives des constructeurs qui montrent plus de volontarisme pour gagner des parts de marché sur leurs concurrents en jouant sur l'innovation (progress continu).

Pour ces scénarios 1 et 2 les producteurs (constructeurs, équipementiers, prestataires de services) sont les impulseurs du changement ; pour les consommateurs, la contrainte pouvoir d'achat reste présente - du moins pour une partie de la clientèle.

Scénario 3 : Nouveaux comportements, nouveaux modèles de développement

Ce scénario suppose de nouveaux comportements des usagers, conduisant à de nouvelles organisations des chaînes de valeur et à une nouvelle segmentation du marché.

Sur certains segments tel que l'urbain, le véhicule particulier n'est plus qu'un « outil de mobilité » dans une chaîne qui peut en comporter beaucoup. Néanmoins il reste un marché pour le véhicule traditionnel.

Dans ce troisième scénario, on ne se prononce pas nécessairement sur la nature de l'impulsion; elle peut résulter :

- De hausses brutales des prix ;
- De changements de comportements, de valeurs des usagers ;
- De percées technologiques ;
- De politiques publiques incitatives aux changements.

1. B1 – ÉLECTRIFICATION DES FONCTIONS

1.1. Définition de la variable

Les systèmes électriques ont connu une recrudescence ces dernières années, avec le développement de technologies automobiles plus poussées. De nombreuses fonctions sont ainsi disponibles sur les véhicules d'aujourd'hui, pour des fins variées de réduction de la consommation, d'amélioration du rendement, de gains de masse et de liberté architecturale. Toutefois, certaines contraintes émergent avec l'intensification des fonctions. Ainsi, les nouvelles automobiles consomment de plus en plus d'énergie, à tel point que les véhicules peuvent se trouver en situation critique d'approvisionnement électrique. Par ailleurs, la sophistication croissante des véhicules rend leur réparation plus complexe, et leur sûreté de fonctionnement apparaît désormais comme un enjeu majeur.

L'électrification des fonctions tend sensiblement à partager l'analyse avec l'électronisation des véhicules, du fait de leur étroite interaction dans le fonctionnement normal du véhicule. La combinaison de trois facteurs a entraîné l'explosion de la présence du couple électrique/électronique dans les voitures :

- Les intérêts environnementaux (normes européennes d'émissions) ;
- Les recherches d'économies de carburant ;
- La quête de confort et de sécurité pour le conducteur.

1.2. Indicateurs pertinents

- Consommation électrique du véhicule ;
- Nombre de fonctions électrifiées.

1.3. Synthèse des évolutions passées et conséquences pour la filière automobile

- Le développement des fonctions électriques dans les véhicules, lié à la fois à la recherche de sécurité, d'efficacité énergétique et de quête de confort, va de pair avec l'augmentation du poids de l'électronique.
- La complexité croissante des systèmes fait de la fiabilité et de la sûreté de fonctionnement un enjeu prospectif majeur.
- La tendance à l'électrification renvoie à une problématique plus large, celle de la consommation électrique des véhicules - ce qui renvoie aux véhicules électriques et à la question de la taxation des consommations selon le type de carburant utilisé (la génération électrique étant elle-même productrice de CO₂).

1.4. Rétrospective

Dans une optique d'optimisation des facultés des véhicules automobiles et, plus largement, dans une perspective de développement de véhicules propres à haut rendement, la gestion moteur a été la première partie du véhicule à être équipée de modules de contrôle électroniques, et par là d'éléments électriques. Cependant, la fiabilité de ces avancées démontre rapidement l'ampleur des chantiers d'amélioration pour aboutir à l'optimum visé, le tout électrique. En effet, **plus de**

60 % des défaillances diagnostiquées concernent la gestion moteur, dont les nouvelles technologies électroniques embarquées sont les principales contributrices.

Tableau 1 : Part des défaillances selon les produits

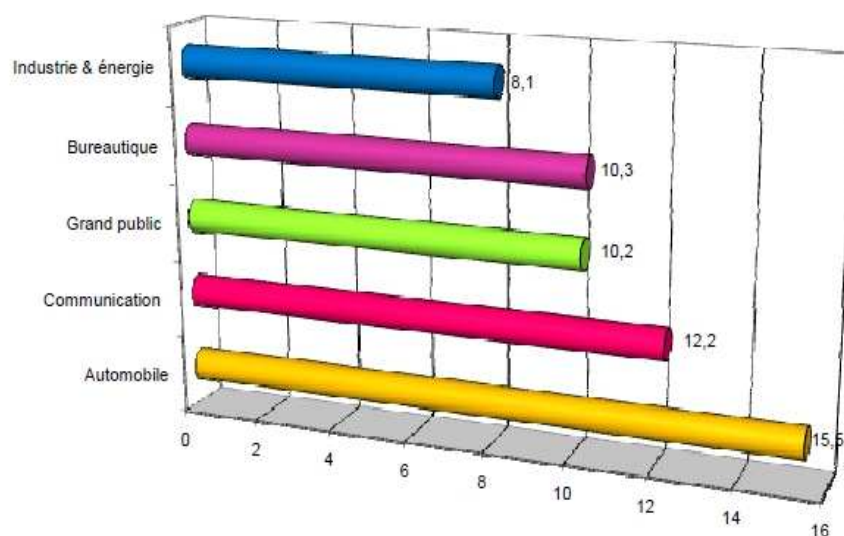
Désignation du produit	Part des défaillances
Sonde à oxygène, Calculateur	31,6%
Vannes EGR, électrovanne de purge	29,0%
Codes constructeur	18,9%
Allumage et capteurs	16,1%
Transmission	2,6%
Régulateur de vitesse	1,4%
Circuits électriques	0,1%
Injecteurs d'essence	0,1%

Source : Delphi

En outre, ce pourcentage devrait sensiblement augmenter avec la croissance inévitable de l'électronique dans la gestion moteur. Alors qu'ils ne représentaient que 7% des composants en 1970, **les composants électroniques devraient atteindre 40% en 2010, après avoir atteint 20% en 2005**, selon l'équipementier Delphi. Les problématiques autour des composants électroniques et électriques s'intensifient donc ces dernières années. En particulier, la question se pose de la gestion des connections et des flux d'informations à l'intérieur du véhicule.

Selon le CEA, l'automobile représente 13% du marché mondial de l'électronique avec un taux de croissance de 15,5% en moyenne par an. L'électronique est le principal facteur d'innovation dans le domaine de l'automobile et la base de plus d'une innovation sur deux. Le marché mondial des systèmes embarqués pourrait représenter 230 milliards de dollars à l'horizon de 2015, avec une forte percée des applications de freinage, de direction, de confort et de sécurité.

Graphique 1 : Taux de croissance des composants électroniques par secteur



Source : Mercer

1.4.1. L'émergence du multiplexage

Il a été identifié très tôt chez de nombreux constructeurs un besoin de proposer une alternative aux architectures électriques filaires dites classiques, à cause du nombre croissant de fils et de points d'interconnexion dans un véhicule.

PSA Peugeot Citroën fut le premier, dès les années 1990, à équiper certains de ses véhicules (les XM) d'une architecture qui réunit plusieurs informations en une seule infrastructure, un seul fil électrique. Cette technologie, le **multiplexage**, utilisée depuis plus de 20 ans dans l'aéronautique, consiste à relier par un câble unique, selon une architecture en réseau, différents équipements électriques ou électroniques. C'est grâce à cette technologie qu'il est aujourd'hui possible d'avoir différentes informations de voyage affichées au tableau de bord, d'indexer la mise en marche de l'essuie-glace arrière au passage de la vitesse, par temps de pluie, ou d'allumer automatiquement les feux dès que le capteur de pluie démarre les essuie-glaces...

En outre, le **multiplexage** augmente considérablement la fiabilité des automobiles puisqu'il **simplifie énormément l'architecture électrique en réduisant de 40% le nombre de faisceaux, ou connexions**. Même s'il n'offre qu'un gain de poids mineur, de l'ordre de cinq kilos par véhicule, le système permet déjà de faire un diagnostic précis de chaque fonction. Chaque capteur envoie à l'unité centrale son statut, et, lors du passage chez le mécanicien, la voiture transmet toutes ses données à une centrale de diagnostic, où le mécanicien peut vérifier le bon fonctionnement de la moindre ampoule connectée.

Cependant, malgré des utilisations déjà avancées, la technique du multiplexage n'est pas encore totalement maîtrisée par les acteurs de la filière automobile. Ceux-ci doivent en effet reformuler le principe utilisé dans l'aéronautique pour l'appliquer à celui un peu différent d'une voiture et ainsi entrevoir le bénéfice des débouchés aéronautiques pour les véhicules terrestres.

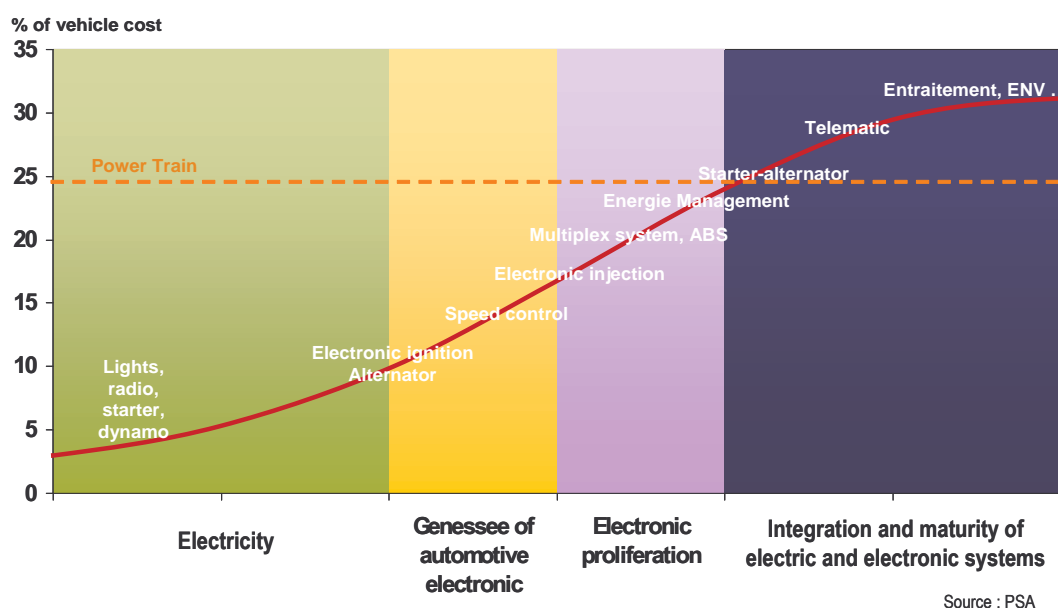
L'utilisation du multiplexage devrait ainsi permettre, grâce au courant porteur généré, de développer très rapidement des systèmes dits by-wire dans lesquels la commande mécanique est entièrement remplacée par une commande électrique. Le système de freinage ou de direction pourrait ainsi fonctionner sans aucune liaison mécanique, en intégrant aussi une redondance des informations pour sécuriser les commandes électriques.

Cette probable prolifération des équipements à source électrique ne doit cependant pas occulter d'autres développements menés depuis de nombreuses années et qui ont vu le taux d'équipement électrique se développer fortement, au même titre que le coût induit par ces mêmes composants.

1.4.2. L'offre de fonctions électrifiées

Les fonctions électrifiées concernent à l'heure actuelle toutes les fonctions d'un véhicule : les dispositifs de sécurité, les dispositifs d'aide à la conduite, les fonctions de motorisation et certaines fonctions mécaniques qui sont remplacées par des fonctions électrifiées. À l'instar du développement de l'électrique dans les véhicules, **l'architecture électronique a aussi connu un fort développement du fait de l'interaction induite**, comme nous l'avons vu précédemment. Le marché de l'électronique automobile a donc progressé de façon très rapide ces dernières années, dépassant même le rythme sur le marché global de l'électronique, toutes applications confondues, et de la production de véhicules. Son poids (lié implicitement à celui de l'électrique, soit 30% du coût d'un véhicule) est essentiellement dû au système embarqué (logiciel).

Graphique 2 : Degré de pénétration des équipements électriques et électroniques



L'électrification des fonctions s'est faite progressivement pour atteindre aujourd'hui près de 30% du coût d'un véhicule (graphique ci-dessus). Les fonctions les plus basiques ont d'abord été concernées, puis la transition plus large vers l'électronique s'est opérée. À l'heure actuelle, les débouchés technologiques ont largement trait au couplage électrique/électronique pour des procédés complexes augmentant l'autonomie des véhicules.

Les perspectives d'électrification sont d'autant plus grandes que la technologie électrique tend à évoluer vers un modèle basé sur une alimentation en 42 Volts. Une évolution de l'architecture est en effet incontournable dès lors que l'on souhaite améliorer significativement le niveau d'équipement électrique des véhicules. Cet aspect devrait notamment permettre d'optimiser le rendement énergétique électrique, mais aussi faciliter l'émergence de la direction assistée électrique, d'un système de commande électronique des soupapes, de l'amélioration de la motorisation par la gestion électronique, du multimédia mobile, du confort habitacle et du freinage électrique ...

À l'image de Renault en France, d'autres constructeurs tels que les majors américains travaillent sur la problématique du 42 Volts. Les contraintes techniques de coûts et de normalisation semblent néanmoins inciter les acteurs à une étape intermédiaire bi-tension (14 et 42 Volts) avant le tout 42 Volts.

Plus largement, l'hypothétique développement de l'offre électrique renvoie à une problématique plus large, celle de la consommation électrique des véhicules. En effet, au-delà de la fonctionnalité des systèmes, se pose la question de l'alimentation en énergie.

1.4.3. Consommation électrique et rendement électrique du véhicule

Depuis 1980, les véhicules ont augmenté leur consommation électrique de près de 300%, dont près de 250% depuis le début des années 2000. À cette époque, la consommation électrique moyenne d'un véhicule était évaluée à 1,5 kW. L'électrification de la motorisation des véhicules permet d'apporter un certain nombre de fonctionnalités conduisant à une réduction de la consommation d'énergie. Celle-ci est obtenue en **optimisant les conditions de fonctionnement du moteur thermique** et en **récupérant une part variable de l'énergie disponible au**

freinage, dans des hybrides. Les systèmes les plus simples, qui autorisent la suppression du ralenti, conduisent à des gains en consommation de 5 à 7% sur le cycle normalisé européen. Les systèmes les plus complexes, qui permettent plus de fonctionnalités, entraînent des gains pouvant atteindre 40 %.

L'électrification des fonctions sur un véhicule augmente sa consommation en carburant. En effet, sur un véhicule à moteur thermique, l'énergie électrique provient de l'énergie mécanique produite par le moteur, grâce à un alternateur. En l'état actuel des choses, les technologies hybrides développées autour des véhicules diesel/essence augmentent inéluctablement la consommation de carburant pour un nombre de kilomètres parcourus identique sous un régime essence. Même s'ils permettent une économie de carburant sur la facture totale, **les procédés de récupération d'énergie augmentent le poids du véhicule** au même titre qu'ils conservent une connexion avec l'alternateur, rendant de fait une consommation supérieure à kilométrage équivalent sous un régime essence.

En outre, plus le nombre de fonctions électrifiées est important, plus la consommation en électricité sera élevée. La consommation électrique d'un véhicule fonctionnant avec un freinage récupératif peut ainsi être multipliée par 10.

Il n'est toutefois pas aisé d'établir un comparatif des consommations électriques entre les technologies proposées. Il est de toute façon préférable de se concentrer sur un bilan énergétique complet des véhicules automobiles plutôt que sur le rendement électrique pur, du fait de la perte massive d'informations. Un tel bilan permettrait entre autres d'intégrer les pertes dans les lignes de transport, dans le transfo-redresseur (qui fournit le courant à la batterie), dans l'électronique et dans le moteur électrique.

À terme, avec l'émergence du véhicule électrique, la consommation électrique des véhicules devrait être sensiblement revue à la hausse, en comparaison de celle effective avec l'utilisation des véhicules hybrides.

Si cette consommation supplémentaire en électricité viendra en compensation de la consommation initiale de carburant, la question est néanmoins posée du **gain financier de la transition**.

Tableau 2 : Caractéristiques des véhicules hybrides

	Micro Hybrid		Mild Hybrid	Full Hybrid	
	Start/Stop	Start/Stop Récupération freinage	Start/Stop Récupération freinage Propulsion électriq.	Start/Stop Récupération freinage Propulsion électriq.	Start/Stop Récupération freinage Propulsion électriq. Rechargeable Prolongateur autonomie
Puissance électrique	2 – 4 kW	4 – 10 kW	10 – 20 kW	15 – 50 kW	15 – 50 kW
Energie électrique		1 kWh	2 kWh	3 kWh	10 - 25 kWh
Autonomie électrique	0	0	1 km	1 – 5 km	20 – 150 km+

Source : IFP, CCFA, SEV

À la différence de la **consommation électrique** des véhicules, le **rendement énergétique** des véhicules est nettement favorable aux véhicules électriques. Il apparaît en effet qu'un véhicule électrique consomme environ trois fois moins d'énergie finale qu'un véhicule à carburant (hors

hybrides) ayant le même poids et les mêmes performances. Ce rapport est établi selon un principe de base nommée « tank-to-wheel » (« du réservoir ou prise électrique le cas échéant, à la roue »). Ainsi, entre 60 et 70 % de l'énergie consommée par un véhicule électrique est restituée dans les roues, à la différence des véhicules thermiques, hors hybrides, qui transmettent moins de 20% de l'énergie contenue dans le diesel ou dans l'essence aux roues.

1.5. Trajectoires futures possibles

L'électrification des véhicules est appelée à jouer un rôle clef dans l'optimisation des véhicules futurs ; l'implémentation à des niveaux plus ou moins poussés permet d'imaginer une progressivité dans la mise en place et facilitera l'adaptation de l'outil industriel.

Dans le scénario 1 : « Au fil de l'eau » la croissance de la consommation électrique est ralentie par la progression lente des Low Cost et de nouveaux véhicules nettement moins gourmands en électricité du fait de leur équipement réduit au minimum. Néanmoins, les exigences environnementales et de sécurité ouvrent la voie à un fort potentiel de croissance.

Scénario 2 : Innovation « push », marchés pluriels

La dualisation des marchés avec une croissance plus forte des véhicules hybrides et électriques que dans le scénario « au fil de l'eau » se traduit par des évolutions différenciées selon les types de véhicules.

Les annonces des différents constructeurs et équipementiers laissent toutefois penser que l'électrification des véhicules s'accélère et constitue une opportunité. Le niveau d'électrification des véhicules diffusés dépend alors des succès obtenus dans la maîtrise du stockage d'énergie, des coûts et de l'industrialisation.

Cette évolution nécessite une forte mise en place des collaborations entre partenaires : constructeurs, fournisseurs d'énergie et de systèmes de stockage électrique, pouvoirs publics et autorités locales.

Scénario 3 : Nouveaux comportements, nouveaux modèles de développement

Les industriels du secteur comprennent les atouts économiques et environnementaux de l'électrification des véhicules. Les perspectives de pénétration des véhicules hybrides et électriques sur le parc sont rapides et occasionnent une forte demande électrique.

La vitesse de diffusion des nouvelles fonctionnalités dépend toutefois de l'acceptation du prix par les usagers et des progrès technologiques.

1.6. Annexes : indicateurs et perspectives

1.6.1. Offre technologique (multiplexage, fonctions du véhicule)

L'offre de fonctions électrifiées a connu une progression encourageante au cours des dernières années. Évolution majeure, puisque centrale, le multiplexage permet notamment de rapprocher plus encore le comportement d'un véhicule terrestre à celui d'un avion. Et les perspectives ne s'arrêtent pas là. Elles s'étendent dès lors que l'on introduit, comme il est prévu à court/moyen terme, l'alimentation en 42 Volts.

Les perspectives dans le domaine de l'offre technologique sont importantes. C'est ainsi que l'on peut imaginer un accroissement de la puissance des systèmes embarqués, qui générerait une augmentation drastique du taux d'équipement électrique à l'intérieur du véhicule.

L'automatisation des véhicules pourrait dès lors devenir complète et individualisée selon les critères de l'utilisateur.

1.6.2. Part des composants électroniques

La part des composants électroniques est intimement liée à l'offre de fonctions électrifiées. En effet, leur progression est commune, certains composants électroniques étant directement dérivés des procédés électriques et inversement. Il convient par ailleurs de noter que l'intérêt pour l'électronique automobile est grandissant au regard du marché global de l'électronique.

À l'instar des composants électriques, les composants électroniques devraient connaître un accroissement important de leur nombre au sein du véhicule. La sécurisation et le contrôle du véhicule pourraient ainsi être renforcés, au même titre que l'autonomie du véhicule vis-à-vis du conducteur. Une simplification de toute la chaîne de valeur pourrait alors être constatée, du rapport conducteur/véhicule au rapport véhicule/environnement extérieur (communication avec l'environnement afin de prévenir les dangers et autres potentialités).

1.6.3. Consommation électrique des véhicules

Même si elle reste difficile à évaluer de façon très précise, la consommation électrique des véhicules tend naturellement à augmenter avec l'intégration plus massive des composés électriques et électroniques dans le véhicule.

Cette augmentation rentre par ailleurs dans le cadre d'une croissance exponentielle de la consommation depuis 1980, largement accélérée depuis les années 2000.

Malgré une consommation électrique toujours plus forte liée à une électrification plus importante, les avancées en matière de technologies annexes (ergonomie, utilisation des nano matériaux) devraient permettre à terme de limiter sensiblement la consommation électrique. Celle-ci influencera inéluctablement la mise en place d'installations complémentaires pour la génération de l'électricité (centrales nucléaires, éoliennes ...), au-delà des capacités de recharge nocturne d'ores et déjà disponibles.

1.7. Bibliographie

- Perspectives concernant le véhicule grand public d'ici 2030, Jean Syrota, Centre d'analyse stratégique, 28 septembre 2008.
- Quelles synergies à moyen et long terme entre pétrole et nucléaire, Cercle des Actionnaires, Pierre-René BAUQUIS, 25 Novembre 2008.
- Micro and nano technologies smart system integration to enable efficient electrical mobility and the green car initiative, Pietro Perlo Centro di ricerca, Fiat Eposs, 10 Mars 2009.
- Mems in automotive how regulatory issues will reshape the market, Isupply, Septembre 2008.
- Goals and prospects of embedded electronic automotive systems, Joseph Beretta, PSA.
- The fully networked car, Pierre Malaterre, PSA, Mars 2007.
- L'électronique décodée, n°2, ESG France, 2008.
- Dossier de presse enjeux des systèmes embarqués pour l'automobile, Automobile Club de France, CEA, Mardi 26 Septembre 2006.
- L'automobile de demain : un objet mécatronique François De Charantenay, PSA.

- Les technologies clés 2010, Ministère de l'économie, de l'industrie et de l'emploi, 2005.
- Rencontres de l'Usine Nouvelle, congrès Industrie Automobile, septembre 2009.
- Electrification du transport routier, Panorama 2009, IFP.

2. B2 – VEHICULE INTELLIGENT ET SECURITE ACTIVE

2.1. Définition

Les systèmes de véhicules intelligents déjà disponibles contribuent entre autres à diminuer le nombre d'accidents sur les routes, mais aussi à décongestionner les villes et les autoroutes ainsi qu'à réduire sensiblement les émissions de CO₂ et autres gaz à effet de serre.

Il existe deux types de systèmes de véhicule intelligent :

- **Les systèmes autonomes embarqués** qui assistent le conducteur sans communiquer avec l'extérieur : toutes les composantes sont intégrées dans la voiture et traitent uniquement l'information qui en émane. Le contrôle électronique de stabilité (ESC) et le régulateur de vitesse et d'espacement (ACC) en sont des exemples.
- **Les systèmes coopératifs** qui permettent aux véhicules de communiquer entre eux ou avec l'infrastructure. Par exemple les voies rapides aux péages : l'arrêt des véhicules n'est plus nécessaire puisque le péage enregistre le passage du véhicule en communiquant avec lui. De même, le système eCall qui communique avec l'infrastructure, même si le centre d'urgence se situe à plusieurs kilomètres. La communication voiture-voiture est aussi une thématique de recherche et de développement mais aucun système de ce type n'est encore commercialisé.

Qu'il soit à systèmes coopératifs ou autonomes, le véhicule intelligent se doit d'intégrer des logiciels, solutions « softwares », pour la mise en application de ses fonctions. C'est le système embarqué qui permet d'offrir à l'utilisateur cette aide à la conduite. Ces solutions portent donc un grand nombre des enjeux de la branche, et des défis majeurs restent à assimiler : les systèmes se doivent d'être fiables, mais aussi d'assurer une sûreté accrue de fonctionnement.

Nous décrivons ici les nouvelles fonctions automobiles qui se rapportent directement au comportement « intelligent » de celui-ci. Ces fonctions comprennent notamment : les systèmes de localisation GPS 3D, les dispositifs de sécurité active (détection des obstacles à une distance de 30 à 150 mètres, y compris dans les angles morts), les systèmes de gestion de trafic et de mobilité, et les interfaces homme-machines, plus sophistiqués.

2.2. Indicateurs pertinents

- Nombre de capteurs équipant les automobiles ;
- Prestations d'aide à la conduite ;
- Alarmes et informations fournies par l'automobile ;
- Part de l'électronique (contrôle).

2.3. Synthèse des évolutions passées et conséquences pour la filière automobile

- L'intérêt pour les « véhicules intelligents » est certain, tant du côté des producteurs que des consommateurs ;
- Le développement de ces applications suppose toutefois des alliances et partenariats avec d'autres types d'acteurs, notamment avec les acteurs de la recherche ;
- Les applications se trouvent dans l'aide à la conduite, les systèmes de sécurité, l'éco-conduite, le diagnostic, notamment ;

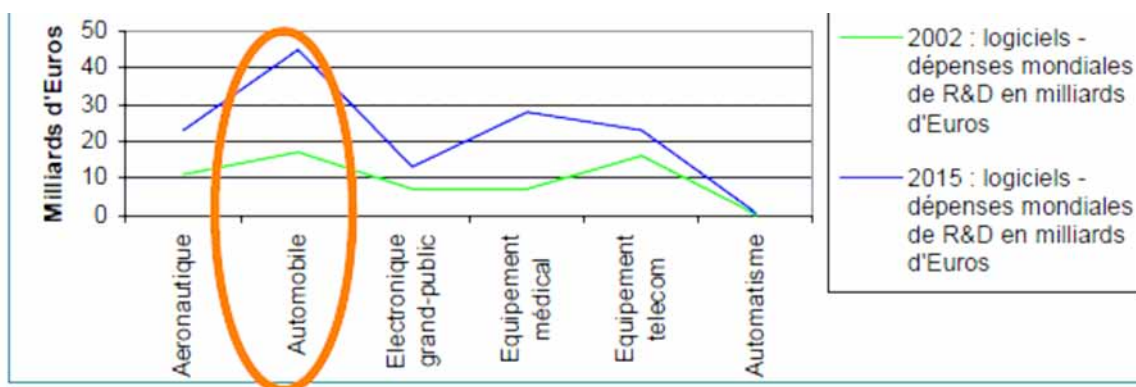
- Le nombre de capteurs équipant les automobiles croît continûment, de même que la quantité d'informations à gérer – posant un défi technologique, notamment dans le cadre de véhicules de plus en plus « personnalisés ».

2.4. Rétrospective

Sensibilisés depuis quelques années aux questions de l'électronique comme outil de simplification des comportements automobiles, les acteurs de la filière ont entrepris la commercialisation de systèmes souvent bridés en fonctionnalités et parfois en performances, malgré des temps et des coûts de développement élevés.

Conscients des enjeux qui pèsent sur l'avenir de l'électronique de fonction pour l'amélioration des méthodes de conception formalisées et « industrielles », les industriels s'allient désormais avec des partenaires de recherche pour assurer une R&D de haut niveau technologique. La très forte croissance (400% entre 2000 et 2010) du marché logiciel automobile (22 milliards de \$ en 2002 à 90 milliards de \$ en 2010) offre des perspectives de recherche prometteuses. En outre, alors que 22% des dépenses de R&D des industriels (17 milliards de \$) étaient consacrées au logiciel dans le secteur automobile, ce chiffre devrait s'élever à plus de 35% en 2015 pour atteindre 45 milliards de \$.

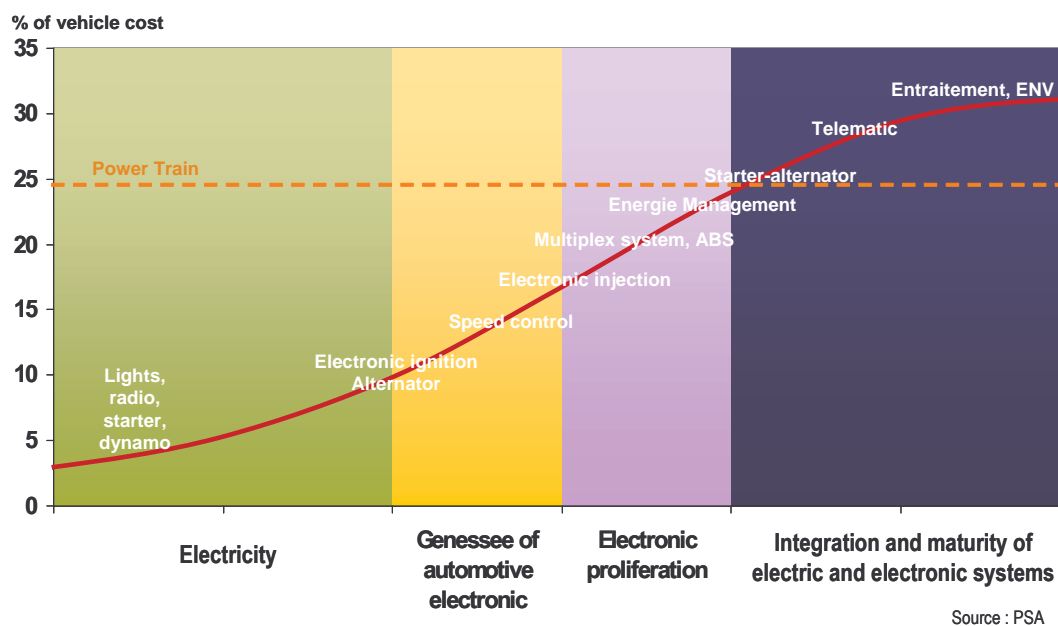
Graphique 3 : Évolution des dépenses de R & D logiciels entre 2002 et 2015 de six secteurs industriels



Source : IDATE News 366

Au-delà des montants de dépenses de R&D, il convient de s'intéresser à l'évolution des montants de l'électronique embarquée, principal facteur lié à l'intelligence intégrée des véhicules.

Selon un schéma simple d'innovation technique, l'électronique embarquée représente désormais plus de 20% de la valeur de chaque voiture et sa part continue de croître. Les systèmes embarqués ont un impact direct sur la compétitivité industrielle des entreprises impliquées et génèrent de nombreuses retombées socio-économiques.

Graphique 4 : Degré de pénétration des équipements électriques et électroniques

En outre, le développement des liaisons de données est indissociable des évolutions en matière de systèmes embarqués (capteurs de fonctionnement, de navigation, de gestion...) et des systèmes sur l'infrastructure (traitement des données, surveillance, communication, outils d'aide à la décision). Mais les problématiques de développement deviennent encore plus complexes dès lors que l'on considère le champ de développement de la technologie à l'échelle internationale. Les liaisons de données doivent alors être mises au point, plus seulement pour des utilisations dans le pays d'origine, mais bien en considérant les conditions d'interopérabilité au niveau régional ou mondial.

2.4.1. Nombre de capteurs équipant les automobiles

D'après les perspectives automobiles qui sont évoquées aujourd'hui, et la tendance à l'assistance à outrance des véhicules de demain, le nombre de capteurs équipant les automobiles semble a priori être un des indicateurs les plus pertinents de l'évolution vers le « véhicule intelligent ». Leur prolifération sur les véhicules en production confirme la tendance. D'après une étude de Isupply, les véhicules haut de gamme d'aujourd'hui possèdent jusqu'à 100 capteurs différents dont une trentaine sont des MEMS (systèmes microélectromécaniques). Ces capteurs, dont les débouchés sont principalement reconnus d'utilité moteur, mesurent entre autres l'accélération, la déviation, la position estimée en fonction de la position de départ (dead reckoning), la gestion de la pression et des flux dans le moteur et le contrôle du châssis.

Mais d'autres fonctionnalités peuvent être envisagées par l'augmentation, dans les véhicules, des équipements en tous genres, et notamment de sécurité et de maniabilité. C'est ainsi que des capteurs d'inclinaison ont été développés en lien avec l'alarme anti-vol et le frein à main, tandis que des capteurs infrarouges permettent la vision de nuit et contrôlent le système d'air conditionné. Dans cette optique, et à titre d'exemple, le système Park4U qui équipe le VW Touran permet de garer automatiquement le véhicule grâce à dix capteurs à ultrasons. Le conducteur garde le contrôle du freinage et de l'accélération tandis que le système prend en charge la direction durant la manœuvre. Le Park4U est une nouvelle étape dans l'aide à la conduite et à la conduite automatique.

2.4.2. Prestations d'aide à la conduite

2.4.2.1. Systèmes de vision embarqués

L'usage des systèmes de vision embarqués n'est pas unique. C'est pourquoi on compte à ce jour plusieurs technologies utilisant le concept de vision afin d'améliorer la conduite du véhicule. Parmi elles, on retrouve notamment les systèmes de sortie de voie, de vision arrière mais aussi les technologies liées à l'éclairage, améliorant de fait les capacités visuelles du conducteur.

D'ici 2010, de nouvelles applications liées à la sécurité, comme la détection de piétons et d'obstacles à courte et moyenne distance (directive européenne 2003/102/CE), seront embarquées sur les voitures neuves. Ces systèmes appelés « smart camera » assurent une performance temps réel indispensable pour des applications automobiles.

Les systèmes de sortie de voie permettent de détecter le dépassement sur une ligne blanche grâce à une caméra et sont adaptés pour de longues distances sur autoroute. La Nissan Infinity en est déjà équipée ; en cas de dépassement sans clignotant, un léger freinage est imposé à certaines roues afin de remettre la voiture dans la file. Sur d'autres modèles (Lexus LS), le conducteur est seulement averti par le système qu'il sort de sa ligne. À terme, le système pourrait modifier la direction du véhicule pour le recentrer sur sa voie.

L'éclairage est lui aussi intelligent, grâce à une caméra située derrière le pare-brise. Ainsi, le système BeamAtic permet d'adapter l'éclairage au type de route et de pente, ainsi qu'aux virages et aux véhicules arrivant de face.

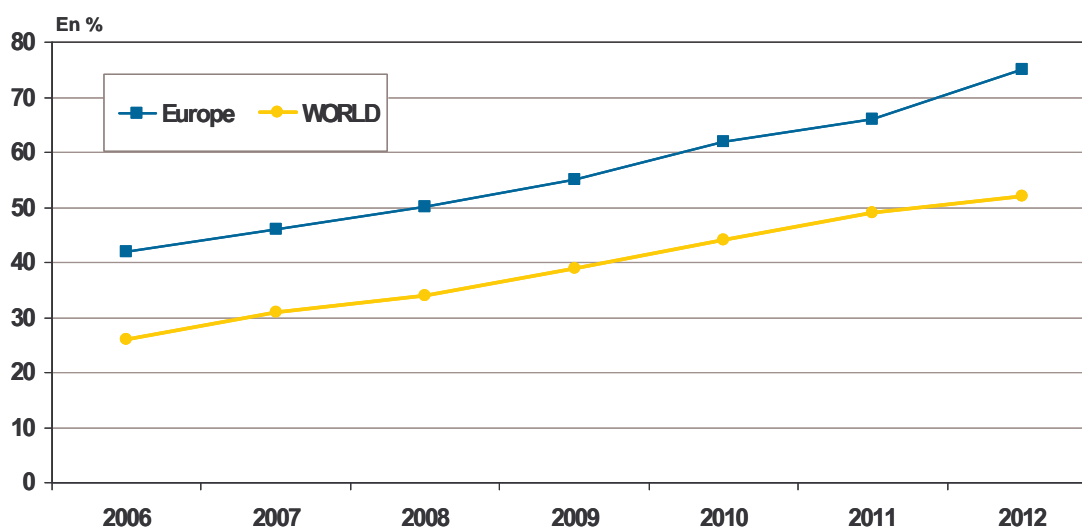
2.4.2.2. Système de sécurité

Considéré comme la principale avancée en matière d'équipement intelligent de sécurité, le contrôle électronique de stabilité (ESC) permet au conducteur de contrôler son véhicule principalement en cas de dérapage (brusque changement de file, contournement d'un obstacle). Le procédé, qui combine les fonctions de l'ABS et de capteurs d'inclinaison, permet de réduire sensiblement le nombre d'accidents.

Commercialisé depuis 1995, l'ESC reste un produit dont la pénétration est limitée. Toutefois, une proposition de la Commission européenne visant à rendre le contrôle de stabilité obligatoire sur tous les nouveaux types de voitures à partir d'octobre 2012, et sur tous les modèles produits à partir d'octobre 2014, devrait permettre d'augmenter significativement le volume d'équipements intégrés. L'Europe apparaît déjà comme un acteur majeur du développement de la technologie, puisque qu'elle détient le taux d'installation le plus élevé. À la différence des pays du vieux continent, la Chine souffre d'un taux très faible d'installation des procédés dans ses véhicules.

En Europe, si la Directive est adoptée, le taux d'installation des ESC devrait augmenter significativement et permettre ainsi de sauver près de 4 000 vies et d'éviter 100 000 blessés par an en Europe, selon les premières estimations rendues publiques.

Dans la moyenne européenne, la France (43% de taux d'installation en 2007) souffre néanmoins d'un léger retard de développement par rapport à ses partenaires clés, puisque ses marchés voisins, l'Espagne et l'Allemagne, affichent déjà des taux d'installation de 50% et 77% respectivement en 2007.

Graphique 5 : Taux d'installation des ESC dans les véhicules

Source : Bosch

Autre système de sécurité, le système de prévention des collisions contrôle la distance séparant le véhicule de celui qui précède, ainsi que sa vitesse de rapprochement. Preuve de l'utilité reconnue du procédé, la Commission européenne réfléchit à imposer cet équipement sur les poids lourds à partir de 2013.

Ainsi, l'engouement autour des systèmes de sécurité, comme le prouve la volonté de la Commission européenne de légiférer autour d'eux dans un horizon de court/moyen terme, traduit bien l'importance de l'enjeu sécuritaire dans les problématiques futures de mobilité.

À une échelle moins diffuse, mais qui apparaît néanmoins comme majeure à l'aube des bouleversements en termes de ressources et de besoins énergétiques, les systèmes de réduction de la consommation de carburant et de rejets induits se développent. Ils permettent notamment d'allier l'agrément de conduite avec le souci de réduction de la consommation de carburant.

2.4.2.3. Aide à l'éco-conduite

L'entreprise Siemens VDO a développé un logiciel d'aide à l'écoconduite nommé Gerico (Gestion de l'Energie par Interface Conducteur). Gerico indique au conducteur le comportement à adopter afin de minimiser la consommation de carburant du véhicule. Le logiciel fournit la vitesse optimale à adopter selon le type de route, le rapport de boîte idéal pendant les accélérations en fonction du type de circulation et du type de route. Les consignes et les messages d'alerte sont visualisés sur le tableau de bord et répétés vocalement par l'autoradio. Le système permettrait une économie de carburant allant jusqu'à 17%.

2.4.3. Alarmes et informations fournies par l'automobile

Alors que certains procédés décrits précédemment intègrent déjà dans leur fonctionnement des technologies liées à l'information fournie par l'automobile (aide à l'éco-conduite et système de prévention de collisions notamment), les alarmes et autres informations fournies par l'automobile constituent un pan très large du développement automobile futur. Cet intérêt certain prouve d'autant l'importance des problématiques de sécurité, via l'émergence des technologies de veille intra et intervéhicules.

Depuis quelques années, la Norvège a développé un des exemples les plus flagrants d'utilisation de l'intelligence d'un véhicule à des fins sécuritaires via un système d'alarme. En effet, en 2004, la ville d'Elvik a effectué une évaluation de l'impact socio-économique d'un système d'alerte fourni dans l'ensemble des véhicules particuliers en Norvège. Il s'agit d'un système qui alerte les conducteurs lors de certains problèmes routiers (accidents en série, travaux routiers, traversées de rails non protégées, véhicules accidentés sur la voirie, véhicules d'urgence) pour des conducteurs se situant à environ 500 mètres d'un de ces incidents. Outre le caractère utile du procédé, on estime que près de la moitié des accidents a pu être évitée sur la période écoulée. Le caractère rentable de l'opération est ainsi évoqué : une brève analyse bénéfice-coût aboutit à un ratio de 1.3 dès lors que tous les automobilistes changent les piles du radar (qui reçoit et émet le signal) chaque année.

2.4.3.1. Diagnostic

Si la part de l'électronique sur le contrôle des fonctions d'un véhicule est importante, il est primordial de pouvoir diagnostiquer les coupures de câbles ainsi que les faux contacts. Les systèmes en développement (CEA-List notamment) devraient être capables de diagnostiquer en temps réel le fonctionnement du réseau et de réagir en conséquence sur les fonctions électroniques d'un véhicule.

Cette technologie pourrait alors être utilisée dans un atelier de réparation pour identifier une panne, et sur route afin d'anticiper une défaillance (maintenance préventive). On parle alors de diagnostic embarqué, fonctionnant pendant que le réseau est opérationnel, et sans en perturber l'activité. Dans ce cas, les systèmes de diagnostic sont répartis au sein du réseau filaire afin d'assurer la surveillance de l'ensemble du réseau. L'intelligence du véhicule en est ainsi largement augmentée.

Les technologies ainsi développées, que ce soit autour du diagnostic ou des alarmes, représentent un pan essentiel de la mutation des usages automobiles. Considérées comme des interfaces de sortie, ces dernières jouent un rôle primordial dans l'information apportée au conducteur mais aussi et surtout pour apporter un feed-back d'acquiescement des actions qu'il accomplit. L'efficacité et l'intérêt de ces procédés peuvent néanmoins être augmentés par une nouvelle forme de communication liée à l'interface homme/machine.

2.4.4. Interface homme/machine

Déjà développées sur certains des véhicules les plus récents, les interfaces homme/machine (IHM) évoluent en termes de fonctionnalités et de facilités d'utilisation. De nouveaux usages apparaissent, comme les commandes vocales ou l'information vocale par le biais de l'autoradio.

Plus largement répandues, les interfaces tactiles et à retour d'effort permettent de communiquer par l'intermédiaire du toucher. Toutefois, même si elle concentre bon nombre d'axes de recherche, la technologie liée au toucher n'est pas exclusive dans le cadre du développement des IHM. En effet, il apparaît que la multimodalité peut un être un facteur déterminant des développements futurs (la parole pouvant posséder des qualités que l'on ne pourrait envisager avec le geste ou le toucher).

La difficulté d'un tel développement vient néanmoins de l'augmentation régulière de la quantité d'informations à transmettre à un conducteur, alors que le nombre de paramètres de personnalisation du véhicule (position de conduite, confort intérieur, alarme de sécurité ...) croît également. Les interfaces posent donc des problèmes aussi bien de l'ordre de la technique (fusion

de données multimodales, détermination de l'information à retransmettre, utilisation au mieux des modalités disponibles en fonction du contexte ...) que de l'humain.

2.5. Trajectoires futures possibles

La coexistence de véhicules Low Cost et véhicules Haut de gamme est inéluctable et l'écart de prix croissant. Mais est-il acceptable d'avoir une sécurité à deux vitesses entre des véhicules achetés neufs? La réponse est non et les futures réglementations vont dans ce sens.

La vitesse de diffusion des différents systèmes dépendra donc à la fois des progrès technologiques et des capacités de financement - qu'il s'agisse des capacités de financement des infrastructures intelligentes, ou des véhicules par les consommateurs.

Scénario 1 : « Au fil de l'eau » les contraintes de pouvoir d'achat des ménages dominant, ce qui conduit à un développement progressif mais relativement lent des technologies et des dépenses de R&D, limitant leur pénétration aux véhicules haut de gamme et à quelques autres modèles, en option.

Scénario 2 : Innovation « push », marchés pluriels

Les grandes innovations en matière de sécurité sur l'automobile se propagent via les véhicules premium, puis les véhicules de moyenne gamme pour se diffuser progressivement plus largement et plus rapidement vers les autres véhicules.

Scénario 3 : Normalisation et/ou nouveaux comportements

Dans ce troisième cas de figure, le renforcement des réglementations européennes sur la sécurité augmente la demande de logiciels auto ; les nouveaux systèmes font partie intégrante du véhicule du futur et le grand défi est la « massification des innovations ».

2.6. Annexes : indicateurs et perspectives

2.6.1. Dépenses de R&D « logiciels »

L'association récente des industriels avec des partenaires de recherche a permis une explosion des revenus du marché logiciel automobile (évalué à 400% entre 2000 et 2010). En outre, la propagation de l'électronique dans les véhicules devrait permettre de pérenniser la croissance à moyen terme. Cependant, les problématiques internationales entament quelque peu les opportunités de développement, car la réalisation du potentiel de croissance des marchés suppose des efforts de recherche plus importants encore.

Les dépenses de R&D logiciels devraient connaître à moyen terme une croissance forte générant des retombées économiques importantes, sous l'effet de l'augmentation des composants électroniques dans le véhicule de demain.

En outre, la viabilité du modèle économique Better Place pourrait ouvrir de nouvelles perspectives liées à la localisation des bornes et à la gestion intégrée du chargement des batteries. Ce dernier champ pourrait être partagé avec l'ensemble des batteries développées pour l'usage d'un véhicule électrique.

2.6.2. Critères technologiques (nombre de capteurs, prestations d'aide à la conduite, alarmes et informations fournies par l'automobile, interface homme/machine)

La gamme des possibles en matière d'intelligence automobile est large. Les technologies d'ores et déjà développées répondent à de nombreux enjeux et témoignent de l'intérêt des industriels pour les problématiques actuelles, notamment en matière de sécurité. Les pays européens, et notamment la France, sont moteurs dans le développement de tels dispositifs.

La tendance au véhicule intelligent semble être correctement acceptée et intégrée au processus d'innovation qui vise les véhicules de demain. Les perspectives peuvent donc se tourner vers une prolifération massive des procédés technologiques à des fins multiples, rendant ainsi le véhicule parfaitement autonome vis-à-vis du conducteur lui-même.

2.7. Bibliographie

- Intelligent Car Brochure Commission européenne.
 - Informatique embarquée Supply Chain Magazine N°31 Janvier-Février 2009.
 - L'automobile et la sécurité Valeo Septembre 2008.
 - L'électronique décodée N°2 Esg France 2008.
 - Toyota Entend Généraliser les systèmes de transport intelligent (Its) A Fin, Mars, Auto-Innovations 3 Avril 2009.
 - Propects for mems in the automotive industry Richard Dixon Et Jérémie Bouchaud Wtc Juillet 2007.
 - Économie de la sécurité routière, Fredrik Johansson, Marine Lericolais, Dominique Mignot Laboratoire d'économie des transports 2 Mai 2007.
 - Mems in Automotive How Regulatory Issues Will Reshape The Market Isupply Septembre 2008.
 - Dossier de presse Enjeux des systèmes embarqués pour l'automobile Automobile Club de France Cea Mardi 26 Septembre 2006.
 - The Fully Networked Car Pierre Malaterre Psa Mars 2007.
- Les technologies clés 2010 Ministère de l'économie, de l'industrie et de l'emploi 2005.

3. B3 – ALLEGEMENT DES VEHICULES

3.1. Définition

Ces dernières années, les automobiles ont vu leur poids augmenter sous l'effet de l'intégration d'équipements électroniques ou de sécurité, alors que dans le même temps les efforts pour l'allègement des structures se sont relâchés. Avec le renchérissement des prix du carburant et la prise en compte grandissante de l'impact des gaz à effet de serre, l'allègement est à nouveau un des enjeux du secteur.

L'intérêt pour l'allègement des véhicules est donc lié à la nécessaire maîtrise des consommations énergétiques (une réduction de 100 kg sur le poids d'un véhicule permet d'économiser une moyenne de 0,5 l/100km de carburant) et à la réduction des émissions de gaz à effet de serre (l'objectif de l'Union européenne est une réduction de 20% de l'émission des gaz à effet de serre par le secteur du transport d'ici 2020).

3.2. Indicateurs pertinents

- Évolution de la masse des véhicules/niveau de gamme ;
- Utilisation de nanomatériaux dans la composition des matériaux synthétiques ;
- Voies techniques utilisées sur les véhicules ou concepts cars les plus légers.

3.3. Synthèse des évolutions passées et conséquences pour la filière automobile

- Le poids des véhicules automobiles continue d'augmenter, sous l'effet de l'intégration d'équipements électroniques ou de sécurité ;
- L'année 2008 semble toutefois avoir marqué une rupture, vraisemblablement sous l'effet des primes à la casse et de la conjoncture économique ;
- Les solutions techniques pour alléger les véhicules comprennent : les nouveaux matériaux (composites), les nanotechnologies ;
- La diversité des acteurs impliqués dans la recherche semble constituer un frein au développement de masse.

3.4. Rétrospective

3.4.1. Évolution de la masse des véhicules

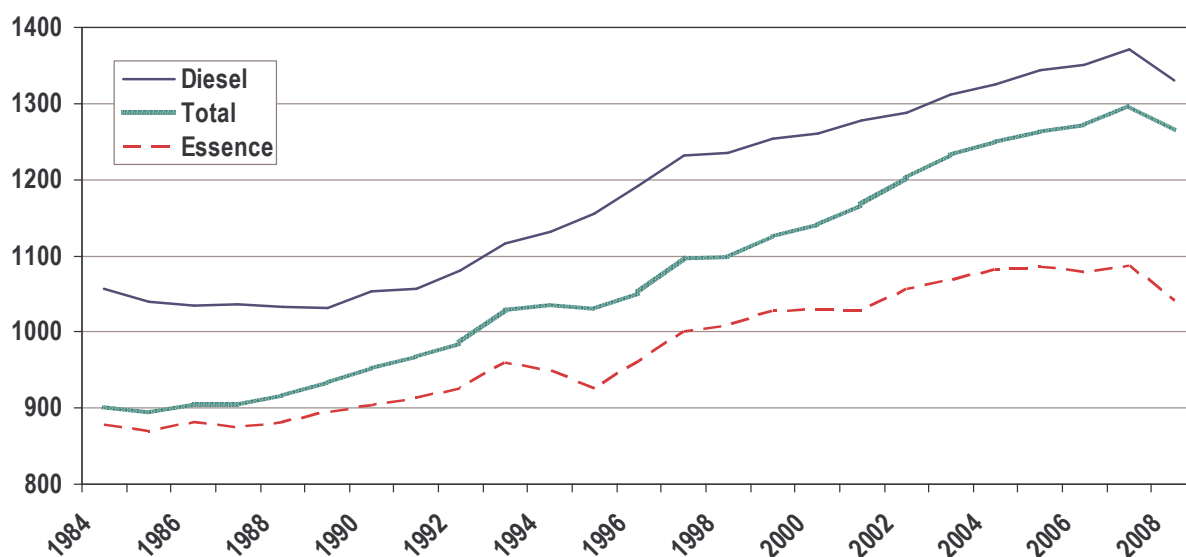
L'allègement des véhicules peut être considéré comme un des symboles les plus forts de la mutation dans laquelle s'inscrit le développement automobile. En hausse depuis plus de vingt ans, l'année 2008 semble marquer une rupture dans l'évolution de la masse des véhicules. On constate ainsi un allègement potentiellement durable dû en partie à la dégradation du contexte économique, mais aussi à la réglementation européenne et nationale de plus en plus drastique en matière d'émissions de gaz à effet de serre.

On comprend ainsi mieux que l'allègement des véhicules, qui ne peut être considéré comme un objectif initial de l'industrie automobile, est en passe de le devenir du fait de contraintes externes

fortes. Un constat clair s'impose en effet : les véhicules légers et moins puissants émettent moins de CO₂.

Or, depuis 1984, la masse des véhicules n'avait cessé de croître, et ce quel que soit le type de motorisation ; le poids moyen des véhicules particuliers est ainsi passé de 900 kg en 1984 à 1300 kg en 2007. Comme le confirme le graphique suivant, cette hausse a été stoppée et le poids moyen des véhicules a été ramené à 1266 kg en 2008, soit un allègement de 2,6%. Cette tendance baissière pourrait s'accroître dans les prochaines années grâce notamment aux innovations technologiques.

Graphique 6 : Évolution de la masse des véhicules par type d'énergie en France (en kilogrammes)

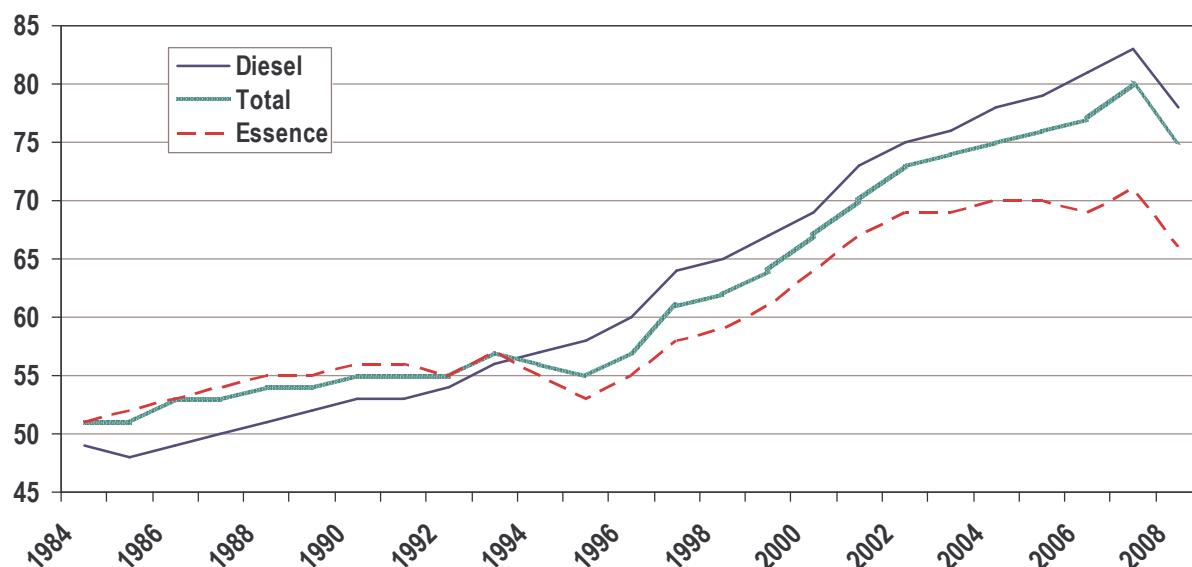


Source : Ademe

La puissance et la masse des véhicules sont deux paramètres corrélés : un moteur moins puissant a une masse moins importante, réduisant de fait le poids de la voiture considérée. Ce constat est ainsi largement démontré si l'on effectue une comparaison simple des évolutions de masses des véhicules (cf. graphique ci-dessus) et de puissance moyenne de ceux-ci (cf. graphique ci-dessous). Toutefois, cette corrélation n'est pas seulement d'origine mécanique. Elle est également issue des déviations mises en place par les constructeurs afin de détourner le client de l'accroissement déraisonnable du poids, l'élément sous-jacent. Ainsi, dès lors que l'on considère que les équipements de confort et de sécurité alourdissent le véhicule, au même titre que les 4x4 et les monospaces sont des véhicules plus lourds que des berlines, les constructeurs ont augmenté la cylindrée et la puissance des moteurs. De 1 292cm³ et 63 chevaux en 1978, le véhicule a atteint 1 576cm³ et 100 chevaux en 2008. De plus, le cercle est vicieux, puisque l'augmentation d'une cylindrée augmente inéluctablement le poids du véhicule, tandis qu'une plus grande puissance exige le renforcement des organes de support d'un véhicule, facteurs là encore d'une prise de poids non négligeable pour le véhicule.

À l'instar de la masse des véhicules, la puissance constatée des modèles, qu'ils soient à moteur essence ou diesel, a donc connu une hausse quasi constante (les véhicules essence ont connu deux années de croissance négative entre 1994 et 1996). Depuis 1984, la puissance moyenne est ainsi passée de 50 kW à 80 kW en 2007, soit une croissance de près de 60 % en 23 ans.

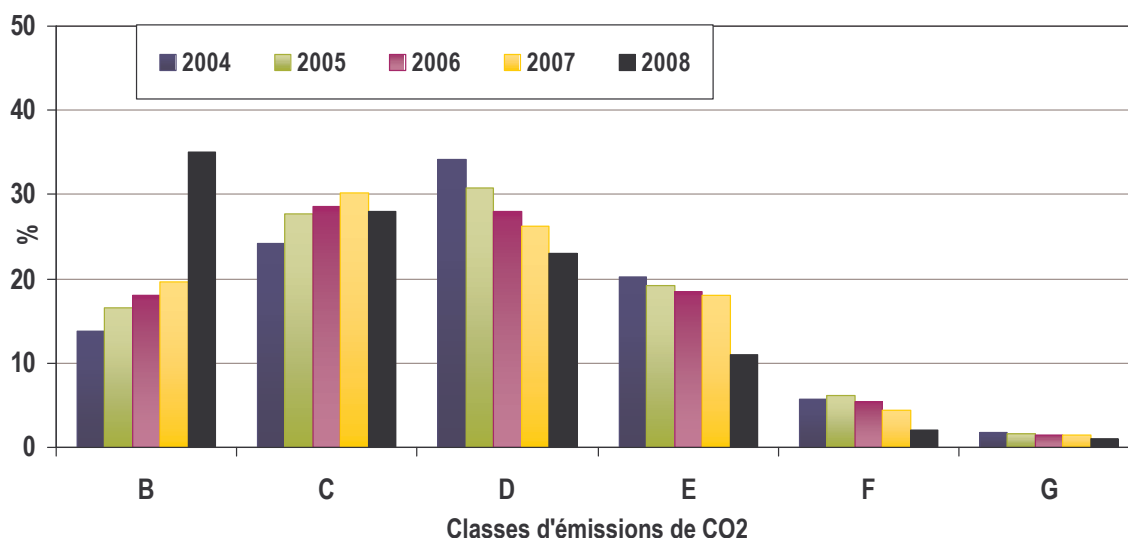
Graphique 7 : Évolution de la puissance moyenne (kW) en France



Source : Ademe

Première raison avancée quant à la chute de l'indicateur de puissance constatée en 2008, le contexte économique. Ce dernier ne semble toutefois pas être le seul facteur explicatif de cette brusque dégradation. En effet, même si les voitures haut de gamme, plus puissantes, ont connu un coup d'arrêt brutal en 2008, il semble que l'impact de la réglementation européenne visant à une réduction d'émissions de gaz à effet de serre ait eu un impact sur le retournement de tendance.

En effet, les véhicules qui émettent le moins de CO₂ sont également les moins puissants et les plus légers. En 2008, on constate donc un report des ventes sur les véhicules moins émetteurs de CO₂. Les classes dites vertes (A, B, C) représentent ainsi 63% des ventes totales en 2007 contre 50% en 2007.

Graphique 8 : Ventes par classe de CO₂(%)

La classe A est presque inexistante avec 1 646 ventes en 2008, puisque seulement trois modèles (Smart Fortwo Diesel, Seat Ibiza et Volkswagen Polo) appartiennent à cette classe.

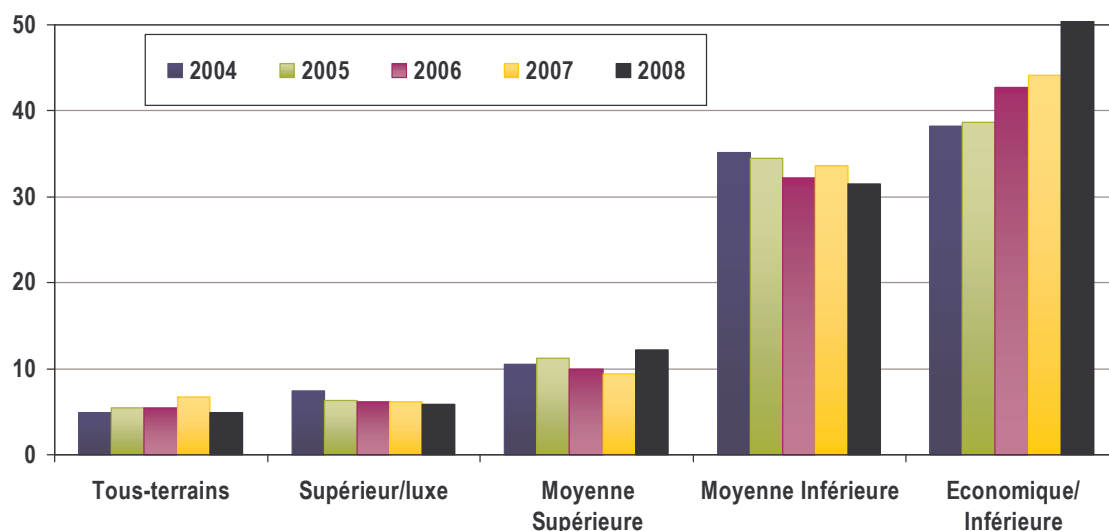
Source : Ademe

Ce report des ventes constaté sur des véhicules moins émetteurs de gaz à effet de serre s'explique en intégralité par **l'instauration du bonus/ malus écologique** qui privilégie les véhicules les plus « propres » donc les plus légers.

Au-delà de l'intérêt que l'on peut porter aux ventes par classes d'émissions, il semble intéressant de compléter notre analyse par un regard sur la répartition des ventes de véhicules par segment.

En 2008, il s'est vendu 36 758 véhicules tout-terrain (4,95% de parts de marché), considérés comme les plus consommateurs et les plus émetteurs de gaz à effet de serre, soit une baisse de 27 % par rapport à 2007 en termes de volumes de ventes. À l'inverse, les véhicules les plus économiques, de gamme inférieure, ont connu la plus forte progression, pour atteindre près de 50 % des ventes en 2008. Ce mouvement confirme que l'engouement des ménages pour les véhicules les plus petits est lié à la fois à l'effet de politiques visant une réduction des émissions de gaz à effet de serre, et au contexte économique morose.

Initialement, l'acheteur d'un véhicule de la gamme économique cherche un véhicule à bas prix mais il ne faut pas occulter le fait que ce dernier cherche également à faire des économies sur le prix du carburant et se dirige donc vers un véhicule peu consommateur. Le déplacement des ventes vers la gamme économique et inférieure entraîne donc inévitablement un déplacement des ventes vers les véhicules moins consommateurs de carburant, moins polluants et plus légers.

Graphique 9 : Répartition des ventes par segment (part en % du total des ventes de l'année)

Source : Ademe

Le contexte économique actuel ainsi que l'objectif de l'Union européenne de diminuer de 20% les gaz à effet de serre du secteur du transport d'ici à 2020, combiné au bonus/malus écologique français, ont donc contribué à faire diminuer la masse des véhicules particuliers. Tout porte à croire que cette tendance va continuer tant que le contexte économique peu favorable durera et que l'objectif de réduction d'émissions ne sera pas atteint. Une prise de conscience écologique d'un grand nombre d'acheteurs peut aussi expliquer la hausse récente – et peut-être maintenue dans le futur - des ventes des véhicules « propres ».

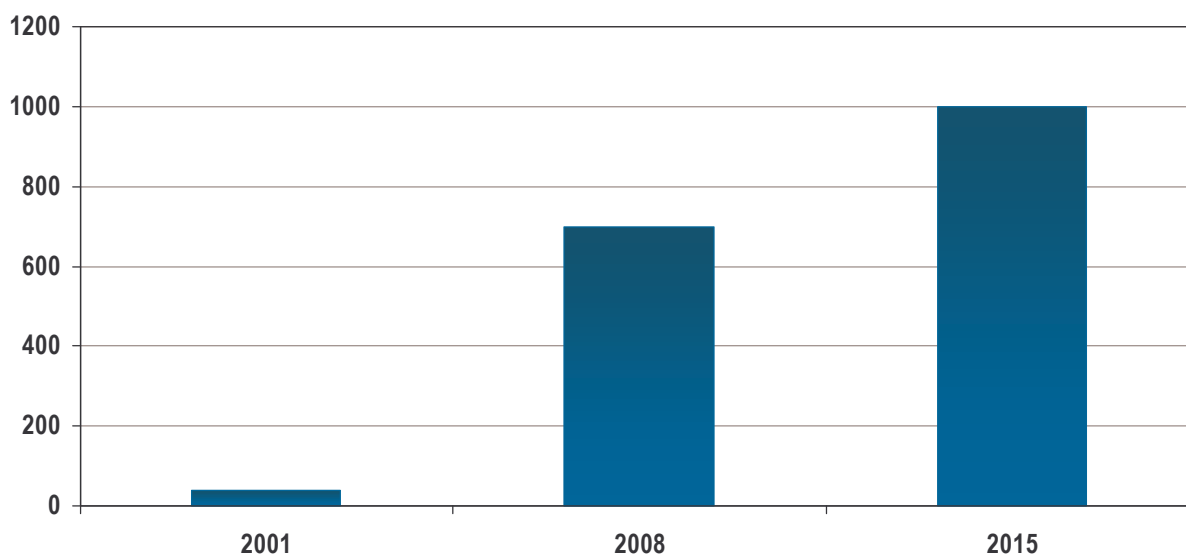
Il convient néanmoins de rappeler que le ralentissement de la croissance des véhicules, tant en termes de poids, que de taille, était ressenti depuis 2006. Il semblait alors que l'automobile avait pris conscience qu'elle ne pourrait persister à croître chaque année.

3.4.2. Utilisation de nanomatériaux dans la composition des matériaux synthétiques

3.4.2.1. Le marché des nanomatériaux

Les nanotechnologies sont un enjeu important pour de nombreux secteurs industriels, dont les équipements de transport et l'électronique. Au niveau de l'électronique, les nanotechnologies sont un avantage pour la miniaturisation et le transfert de données. Etant donné la quantité importante de capteurs et d'électronique qui équipe les véhicules particuliers, une miniaturisation de ces fonctions présente de nombreux avantages. Les nanotechnologies et particulièrement les nanocomposites permettent en outre d'alléger les structures des voitures tout en leur conférant des propriétés particulières (meilleure résistance...).

La Commission européenne a estimé que le marché mondial des nanotechnologies en 2001 était légèrement supérieur à 40 milliards d'euros. En 2010-2015, le marché mondial pourrait atteindre 1 000 milliards d'euros par an et concerner directement l'emploi de près de 2 millions de personnes.

Graphique 10 : Revenu mondial généré par les nanotechnologies (en milliards d'euros)

Source : DGE

La très forte croissance du marché des nanotechnologies est principalement due aux progrès des méthodes d'observation. Cependant, le développement des nanomatériaux passe par la résolution de nombreux défis sur les plans scientifiques et techniques : compréhension et maîtrise des mécanismes fondamentaux à l'échelle nanométrique, procédés de fabrication, impacts notamment sanitaires.

Dans le processus d'élaboration des nanomatériaux, le point clé s'inscrit dans la maîtrise de la structuration des nanoobjets (matériaux nanostructurés) ou dans celle de leur répartition optimale dans les matrices (nanocomposites).

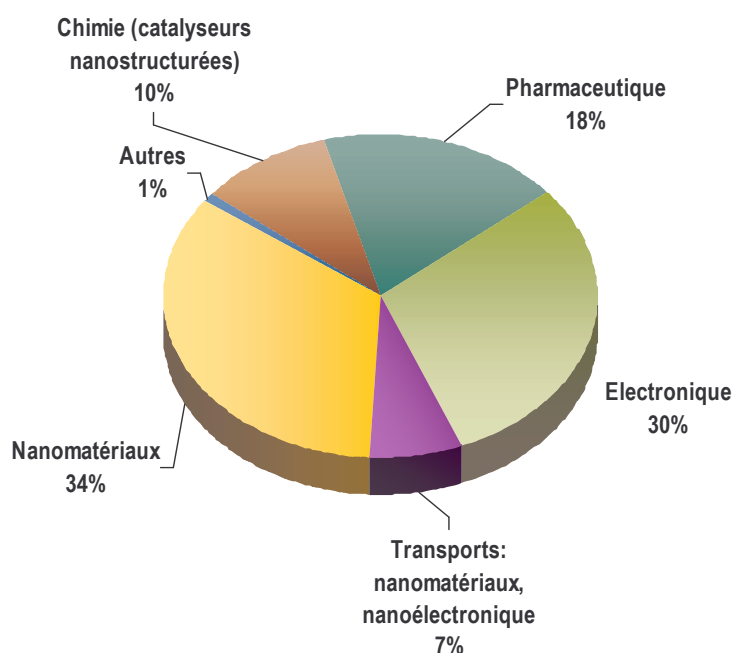
Un frein important émane alors de ce constat, puisqu'il est généralement admis qu'à l'heure actuelle, la production de composites homogènes reste un verrou de l'industrialisation des composites en général. En outre, leur utilisation massive dans la construction automobile se heurte non seulement à la difficulté de les intégrer dans les chaînes de production, mais également aux exigences de recyclabilité.

Aussi, la diversité des acteurs impliqués apparaît comme un frein supplémentaire au développement de masse des nanomatériaux. Il existe en effet peu de relations entre les experts capables de mettre au point de nouveaux nanoobjets et de les intégrer à des matériaux plus complexes, et les industriels des nombreux secteurs susceptibles d'être intéressés.

Enfin, le développement de ces technologies doit concilier le renforcement de la compréhension des aspects fondamentaux associés, et la mise au point de matériaux dont les fonctionnalités répondent aux besoins du marché.

3.4.3. Impact économique des nanotechnologies en 2010

Selon une étude réalisée par la DGE, les nanotechnologies devraient avoir pénétré tous les secteurs industriels d'ici à 2010. Les nanomatériaux devraient représenter, à eux seuls, 35% du marché tandis que le secteur du transport intégrant les nanomatériaux et la nanoélectronique devrait quant à lui représenter près de 7% du marché (cf. graphique ci-dessous).

Graphique 11 : Pénétration des nanotechnologies par secteur industriel

Source : DGE

En 2010, on s'attend à ce que la production de nanomatériaux passe à 500 000 tonnes par an. Des marchés ont été identifiés dans les secteurs des transports, de l'ingénierie et de la haute technologie grâce aux propriétés de ces matériaux qui permettent l'allègement, le renfort des structures et une conception différente des pièces avec, par exemple, la possibilité de travailler sur la réduction d'épaisseur.

Comme évoqué précédemment, la recherche doit toutefois réussir à industrialiser les procédés de fabrication des nanomatériaux, à les contrôler de manière satisfaisante pour répondre aux besoins du secteur automobile, et à s'associer avec les professionnels du secteur tout en continuant la recherche fondamentale. Mais les débouchés connus sont importants et permettront d'inscrire le développement des nanotechnologies dans une tendance haussière durable.

3.4.4. Thèmes de recherche actuellement développés

D'autres thèmes de recherche sont actuellement développés afin d'étendre la gamme des possibles en matière d'allègement de véhicules.

En premier lieu, la recherche apparaît très active quant à l'utilisation des **nanocomposites à matrice polymère, métallique ou céramique** dans le secteur automobile. Ces technologies sont en effet les plus à même de répondre à la demande de légèreté des matériaux du secteur. Dans cette optique rappelons quelques notions clés de cette technologie.

Les propriétés des nanocomposites dépendent de celles des nanoparticules. Ces dernières sont incorporées ou produites dans une matrice pour apporter une nouvelle fonctionnalité ou modifier des propriétés mécaniques, optiques, magnétiques ou thermiques. Les nanocomposites à matrice polymère permettent notamment d'augmenter la résistance des matériaux tout en diminuant le poids des pièces.

En second lieu, on peut décrire une **large batterie de technologies** dont la finalité devient plus étendue que la simple qualité d'allègement des véhicules. On peut ainsi énumérer :

- **les minéraux lamellaires synthétiques**, une alternative aux Montmorillonites d'origines naturelles, qui garantissent pureté et constance de qualité.
- **les poudres d'oxydes simples et mixtes, et les poudres métalliques** (Fe, Ni, Co, Al)
- **les silices nanométriques haute dispersion**, déjà largement utilisées à l'échelle industrielle pour le renforcement des caoutchoucs.
- **les nanofils polymères conducteurs** qui permettent une amélioration des propriétés mécaniques et de la résistance au cisaillement.
- les **nanoparticules fonctionnelles minérales d'oxydes métalliques** (Ti,Ce) en tant qu'absorbeurs UV et charges de renforcement pour la résistance à l'abrasion.
- **les nanofils et nanocâbles coaxiaux** à base de bore et de silicium qui offrent une inertie chimique améliorée, ce qui permet d'envisager des applications en conditions extrêmes ou encore d'assurer une bonne reproductibilité et une plus grande durée de vie des matériaux élaborés.
- **les précurseurs nanométriques** pour l'élaboration de matériaux mésoporeux (par exemple support de catalyse), de haute surface spécifique et de stabilité thermique suffisante dans des conditions d'utilisation.

3.4.5. Voies techniques utilisées sur les véhicules ou concepts cars les plus légers

3.4.5.1. Utilisation de matériaux composites dans les concepts cars

Les composites les plus couramment utilisés dans le secteur automobile sont à 95% des composites thermodurcissables à résine polyester et fibres de verre, en quantité limitée, des composites thermoplastiques (polypropylènes, essentiellement à fibres courtes avec un taux de renfort de 20 à 40%), en quantité très limitée, des composites à matrice époxy (lames de ressort) et de façon marginale, les composites à fibres de carbone (Formule 1).

Les pièces techniques en polypropylène chargé de fibres de verre sont principalement utilisées pour leur résistance aux chocs (renfort de panneau d'habillage, poutre de pare-chocs).

Certains « concept cars » créés prennent en compte l'allègement de la structure du véhicule grâce à l'utilisation de matériaux plus légers. Ainsi, le « concept car » produit par l'American Partnership for a New Generation of Vehicles (PNGV) a une masse de 30 à 45% inférieure à un véhicule conventionnel du même type grâce à l'utilisation de matériaux ultralégers tels des alliages d'aluminium et des polymères.

Rocky Mountain Institute a quant à lui lancé en 2004 le concept de Fiberforge, une berline de taille moyenne ultralégère dont le corps est entièrement fait de composés thermoplastiques renforcés par des fibres dont des fibres de carbone. La transmission et la direction sont entièrement électroniques ce qui supprime le besoin de pièces de mécanique lourde.

La 3CC, le concept car de Volvo utilise le downsizing et des matériaux légers, et est propulsée par une batterie ion-lithium. La légèreté de la 3CC est due à l'utilisation d'acier pour le cadre et de composite pour les panneaux du plancher alors que le corps extérieur est une coque de fibre de carbone collée.

Enfin, une nouvelle forme d'acier l'AHSS (Advanced-High-Strength-Steel) plus léger que l'acier traditionnellement utilisé par les constructeurs automobiles équipe certains modèles récents et permet une réduction de la masse totale du véhicule de 9%.

3.4.5.2. Innovation architecturale

Grâce aux nouvelles méthodes de conception par CAO et de simulation, les structures peuvent être dimensionnées afin de réduire les épaisseurs de matériaux aux endroits les moins critiques et, à long terme, des architectures totalement différentes de celles que l'on connaît peuvent être envisagées. Le poids peut alors être sensiblement réduit.

3.5. Trajectoires futures possibles

Les innovations industrielles de réduction de poids d'un véhicule apportent de nouvelles solutions ou sont en complète rupture et agissent sur :

- les matériaux de base (nouveaux aciers, fibres naturelles, matériaux recyclés, biomatériaux, matériaux à base de bois, plastiques à haute performance mécanique ...) ;
- l'architecture du véhicule (cockpits, modules de portes, face avant arrière, sièges, plancher...) ;
- le design produit (nouveau ratio poids/performance, combinaisons de fonctions, optimisation de composants, intégration de fonctions, solutions intelligentes ...) ;
- et l'optimisation de l'ensemble du process manufacturier.

Sachant que le poids d'un véhicule a un coût (100 kg du véhicule entraîne une hausse de +7% de la consommation en carburant et des émissions de CO₂ qui seront taxées) et que le poids moyen est fortement corrélé à l'évolution des segments de gamme et de leur taille, la tendance lourde du poids d'un véhicule est un allègement progressif plus ou moins rapide selon les scénarios.

Dans le **scénario 1 « Au fil de l'eau »** la maîtrise de la consommation en carburants et la réduction des émissions de GES réglementée imposent un allègement régulier des véhicules.

Le **scénario 2 : Innovation « push », marchés pluriels** suppose une substitution des matériaux à performances mécaniques et sécuritaires identiques, indépendamment de l'impact sur la recyclabilité des véhicules.

Dans le **scénario 3 : Nouveaux comportements, nouveaux modèles de développement**

La filière réussit l'industrialisation complète des procédés. La structure des véhicules est totalement repensée avec une parfaite maîtrise des coûts et de la recyclabilité des produits.

3.6. Annexes : indicateurs et perspectives

3.6.1. Évolution des indicateurs de masse et de puissance des véhicules

Basé sur des données de l'Ademe, c'est le rapport des deux indicateurs de masse et de puissance qui interpelle. Ainsi, on observe une rupture de tendance commune en 2008, synonyme d'un effondrement des ventes des véhicules les plus lourds, lié à la réglementation en vigueur mais aussi au contexte économique dégradé.

Au-delà d'une simple inflexion, tout le procédé de conception semble s'être modifié. La corrélation poids/puissance devrait ainsi apparaître moins évidente dans les prochaines années.

L'allègement des véhicules est inévitable et la tendance à la dépendance du poids vis-à-vis de la puissance entamée en 2006 semble renforcer cette hypothèse. L'allègement des véhicules pourrait modifier plus profondément le dessin des véhicules, en permettant des gains non négligeables en matière d'ergonomie.

3.6.2. Évolution du niveau de gamme des véhicules

Implicitement liée aux classes de CO₂, la répartition par niveau de gamme s'est profondément modifiée en 2008 sous l'effet de la réglementation visant à limiter les émissions de gaz à effet de serre. En outre, le contexte dégradé a facilité l'attrait des plus petits véhicules, moins consommateurs de carburant, et de fait plus légers. Ce basculement a eu pour conséquence le recul du poids moyen des véhicules.

La répartition des ventes par niveau de gamme pourrait être revue dans les années à venir sous l'effet d'un rapport à la masse qui aura changé. Il ne sera ainsi pas évident que les véhicules les plus petits soient toujours les moins polluants car plus légers. Il pourrait désormais être convenu que seul le rapport à la puissance et à la cylindrée du véhicule puisse être le baromètre des rejets polluants.

3.6.3. Degré de pénétration des nanomatériaux dans la structure automobile

Peu développées au début des années 2000, les nanotechnologies connaissent une croissance importante tant en termes de revenus que d'intégration aux procédés, y compris automobiles. En outre, elles font l'objet d'intérêts multiples car elles bénéficient de vastes débouchés techniques.

Toutefois, les marges de progression de la recherche restent élevées, et la technologie semble être à quelques années de la maturité.

Si la filière réussit le pari d'une industrialisation complète des procédés, il semble raisonnable d'imaginer qu'à moyen terme la structure des véhicules puisse être totalement repensée. Cette réussite pourrait ainsi alimenter la filière amont des constructeurs de batteries, qui verraient en cela le moyen efficace de résoudre le problème de génération de puissance.

3.6.4. Degré d'implication des concepts cars dans le processus d'allègement

Depuis quelques années déjà, les « concepts cars » intègrent les nanotechnologies. L'intérêt marqué pour ces technologies est grand et les avancées en la matière sont vérifiables sur les prototypes. Alors que l'intégration dans des véhicules est prouvée, c'est la production de masse des composés qui pose problème

3.7. Bibliographie

- Monitoring The Co2 Emissions From Cars In The Eu : Data For The Years 2005, 2006, 2007 Commission européenne Com(2009) Janvier 2009.
- Les véhicules particuliers en France Ademe Avril 2008.
- Réduction de poids, l'automobile à la diète L'usine Nouvelle N°3072 11 Octobre 2007.
- L'industrie française des matériaux composites Étude réalisée par Nodal Consultant pour le compte de la Digitip / Sim Mai 2002.
- Les technologies clés 2010 Ministère de l'économie, de l'industrie et de l'emploi 2005.
- Reducing Co2 emissions from New Cars Progress In 2007 European Federation For Transport And Environment Août 2008.

- Reducing Co2 emissions from New Cars European Federation For Transport And Environment Janvier 2005.
- Communiqué de presse Loremo, présentation au Geneva Motor Show de La Loremo Ls.
- Étude prospective sur les nanomatériaux Étude réalisée par Developpement & Conseil pour le compte du Minefi / Digitip / Simap Digitip Synthèse Mai 2004.

4. B4 – MOTORISATION HYBRIDE ET ELECTRIQUE ET CONSOMMATION

4.1. Définition de la variable

La période actuelle voit le retour au premier plan du véhicule électrique. Le progrès technique, la raréfaction annoncée des réserves pétrolières, la prise de conscience environnementale et la crise financière mondiale sont autant de facteurs qui stimulent son émergence. Toutefois, la morosité actuelle influence négativement l'engouement pour le tout électrique. Les acteurs sont en effet plus tentés par les effets d'annonce que par la mise en place effective d'une nouvelle chaîne de valeur, légitimement créatrice de perspectives plus abouties. Des avancées plus ou moins matures sont néanmoins ressenties dans la branche et la transition vers le tout électrique s'amorce depuis peu.

Le véhicule hybride, qui peut s'assimiler à un véhicule thermique à complément électrique, représente une étape intermédiaire vers le véhicule hybride rechargeable puis l'hypothétique tout électrique. Le véhicule hybride s'inscrit en effet dans le processus lent d'avènement du véhicule tout électrique. Seulement, la viabilité économique des technologies hybrides rechargeables et électriques reste fragile. Les défis technologiques soulevés par la question de l'électrique sont en effet nombreux et complexes : il faut optimiser le rendement du moteur et accroître la performance de l'électronique de puissance, en impliquant une incontournable évolution des possibilités de rechargement direct sur le réseau électrique.

4.2. Indicateurs pertinents

- Offre de véhicules hybrides (couple carburants pour hybrides) dans le monde et consommation ;
- Offre de véhicules électriques rechargeables ou non, consommation.

4.3. Synthèse des évolutions passées et conséquences pour la filière automobile

Au cours des dernières années, l'implication des industriels de la filière et le développement du véhicule hybride et électrique se sont accentués et généralisés à l'ensemble des marchés continentaux, activité longtemps concentrée aux États-Unis et au Japon.

La rupture vers l'électrique semble incontournable à moyen terme :

- Des technologies plus ou moins avancées permettent à l'heure actuelle de se projeter raisonnablement dans le développement du procédé ;
- Il convient de se détacher des annonces actuelles en matière d'avancées technologiques, car fortement corrélées aux besoins de visibilité de la clientèle.

4.4. Rétrospective

4.4.1. L'émergence de la problématique des véhicules hybrides et électriques

Si l'intérêt pour le véhicule hybride semble récent, c'est pourtant Toyota qui, dès 1985, a été le premier acteur du secteur à se sensibiliser à la problématique des véhicules électriques et

hybrides. Interpellé par les problèmes naissants d'effet de serre, Toyota a décidé d'intégrer l'électronique et l'électrique aux technologies existantes de ses véhicules. Pour ce faire, il a développé, dès 1989, un centre de recherche et de production de composants au Japon afin de maîtriser de façon industrielle l'ensemble des technologies propres aux véhicules hybrides. Le fruit de cette recherche n'a vu le jour que dix années plus tard, en 1997, avec le lancement en série de la Prius.

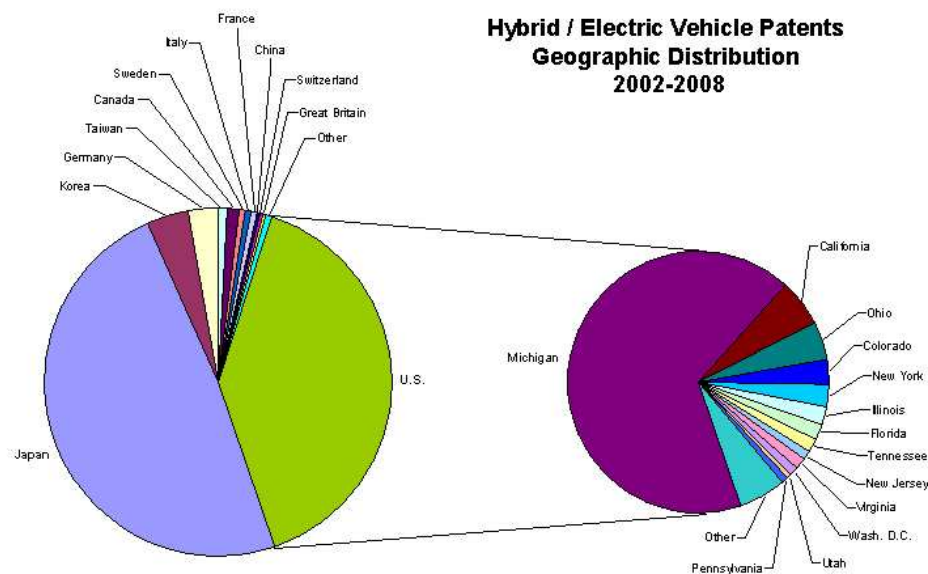
Les autres constructeurs se sont intéressés plus tardivement aux problèmes soulevés par l'augmentation des rejets des gaz à effet de serre. Les européens ont développé leurs premières solutions à partir des années 2000, à l'image des véhicules faiblement hybridés avec altesno-démarrreur.

La technologie américaine, aussi initiée après les années 2000, s'est plus largement développée sur les véhicules plus gourmands en carburant, les 4x4 et les mini-vans, mais dans des effets tout aussi mesurés (solution de l'altersno-démarrreur largement retenue).

À la différence de Toyota, les solutions adoptées par les acteurs les plus récents de la branche hybride, principalement tournées vers l'altersno-démarrreur, leur ont permis de s'engager dans la course avec un risque industriel et commercial moins élevé. Cette implication lente et moins risquée traduit la volonté relativement forte de la majorité des acteurs d'amorcer une transition douce vers le tout électrique.

Au cours des dernières années, les évolutions, au même titre que l'implication des industriels de la filière, se sont néanmoins faites plus fortes. Toutefois, même si le développement du véhicule hybride s'est accentué et généralisé à l'ensemble des marchés continentaux, l'activité reste plus largement concentrée dans les deux pays que sont les États-Unis et le Japon, comme le prouve l'indicateur du nombre de brevets déposés (Clean Energy Patent Growth Index, CEPGI, publié par Heslin Rothenberg Farley & Mesiti's Cleantech Group) sur la période 2002-2008. Il renseigne sur le degré d'innovation depuis 2002 dans les technologies dites "écologiques".

Graphique 12 : Nombre de brevets déposés par zone géographique



Sources: Heslin Rothenberg Farley & Mesiti P.C.

Au regard du nombre d'acteurs lancés dans la transition vers le tout électrique, et au-delà de l'actuelle concentration de l'innovation sur deux zones (Japon et USA), l'offre de solutions est relativement fournie. Les caractéristiques des concepts et autres systèmes de propulsion diffèrent suivant les constructeurs et les modèles de véhicules. Le degré de pénétration de ces solutions n'est en effet pas uniforme. La plupart des acteurs s'engagent dans la voie de l'hybridation de façon plus douce, faisant appel aux puissances électriques les plus faibles.

Il convient de rappeler les principes fondamentaux de ces technologies pour en apprécier les impacts à la fois environnementaux et économiques.

4.4.2. Les véhicules hybrides

La transition vers le véhicule hybride a d'abord été initiée par le déploiement généralisé de la microhybridation (offrant un gain de 10% en circuit urbain pour un surcoût d'environ 150 €), avec pour exemple le succès du système Stop&Start de Valeo ou celui de Bosch.

Le véhicule hybride n'est plus la juxtaposition de deux chaînes de traction qui travaillent en alternance : tous les composants et tous les éléments mécaniques sont optimisés et travaillent de concert afin de minimiser en permanence la consommation en carburant du véhicule tout en veillant à maintenir un faible niveau d'émissions polluantes et de bonnes prestations du véhicule (accélération, confort de conduite). L'optimisation des stratégies de contrôle des différents éléments du véhicule s'avère très complexe. Tous les modes de fonctionnement ne sont cependant pas possibles avec toutes les architectures de véhicules : on distingue alors différentes catégories d'hybrides selon les fonctionnalités offertes.

Pour sa part, l'hybride couplant un moteur GPL à un système électrique de propulsion reste très marginal, peu de constructeurs s'engageant dans cette voie (Hyundai est, à ce jour, le seul utilisateur du couple GPL/électricité).

Tableau 3 : Classification des différents types d'hybrides

Type d'hybride	Fonctions	Puissanc. électriq.
Mini-hybride Alterno-démarrreur Stop&Start	Arrêt du moteur thermique au ralenti	2 kW
Stop&Go	Freinage récupératif	3kW
Mild-Hybrid	Réduction du dimensionnement (downsizing) du moteur thermique et assistance à l'accélération	10kW
Full-Hybrid	Mode électrique pur	30kW
Plug-In Hybrid	Hybride rechargeable sur secteur	65kW
Range Extender Véhicule à autonomie prolongée	Association entre les composants des véhicules à propulsion électrique, un moteur à essence et à une génératrice d'électricité intégrée afin de produire l'énergie supplémentaire nécessaire pour alimenter au besoin le système électrique	200 kW
Roue Active	4 moteurs électriques placés dans chacune des roues, limitant la perte d'énergie liée à la présence d'une boîte de vitesse et de transmission	65kW

Sources : IFP - BIPE

4.4.3. Les véhicules hybrides rechargeables

À la différence du véhicule hybride simple avec batteries électriques embarquées ou autosuffisantes (roue active), le véhicule hybride rechargeable (plug-in) cumulerait les avantages du thermique et de l'électricité sans en avoir les inconvénients les plus importants.

Très peu de facteurs limiteraient son utilisation sur un éventail d'environnement très large. Ainsi, le véhicule hybride rechargeable qui, à la différence du véhicule hybride simple, peut s'assimiler à un véhicule électrique à complément thermique, combinerait les avantages des véhicules électriques en ville (faibles nuisances locales) et des véhicules thermiques à combustible liquide sur route (autonomie, performances sur route). De ce fait, il ne nécessiterait pas, à l'inverse du véhicule tout électrique, d'une infrastructure d'alimentation électrique dense et maillée sur l'ensemble du territoire.

4.4.4. Les véhicules à technologie hydrogène

Actuellement considérée comme la voie de la rupture et la bascule vers le tout électrique, la solution de l'hydrogène concentre de nombreux axes de recherche en matière de transports, et particulièrement de véhicules.

Parmi ces axes, un premier reste fidèle à la motorisation hybride : l'hydrogène liquide nourrit un moteur à combustion interne et permet de s'approcher des capacités de stockage du réservoir à essence, même si la différence reste notable (tant en termes de volume que de masse). Un second tend à satisfaire la technologie d'une voiture 100% électrique : l'hydrogène gazeux alimente une pile à combustible qui elle-même nourrit un moteur électrique.

A l'heure actuelle, la technologie hydrogène se concentre sur un échantillon très restreint de constructeurs et véhicules automobiles : BMW est l'unique acteur faisant appel à la technologie hydrogène par le biais de sa Série 7.

4.4.5. Offre actuelle et future de véhicules hybrides, plug-in et électriques

Enfin, devant la variété des technologies proposées pour répondre à la mutation du secteur, le rôle des constructeurs n'est évidemment pas neutre. Ils restent la vitrine des différents procédés mis en avant. Le tableau ci-après rappelle les principaux projets des constructeurs sensibilisés à la problématique de l'énergie électrique dans le véhicule de demain.

Tableau 4 : Lancements des modèles hybrides et électriques

Ce tableau, à titre indicatif, doit être réactualisé régulièrement au gré des annonces des constructeurs et de la presse spécialisée

Marques	Modèles		2009	2010	2011	2012	2013
ALFA ROMEO	CXover hybride	hybride					
AUDI	A2 Q5 hybride Audi E-Tron	hybride diesel hybride 100% électrique					
BOLLORE BATSCAP-PININFARINA	B0 (Blue Car)	100% électrique					
BMW	Série7 ActiveHybrid SérieX6 ActiveHybrid Isetta série 1						
MINI	Mini E	100% électrique		S2			
CHEVROLET	Volt	100% électrique					
CITROËN	C-Métisse DS5 Hybrid4 Berlingo C-Zero (PSA/Mitsubishi)	hybride rechargeable hybride Dies/élec 100% électrique 100% électrique		4T			
SVE DASSAULT-HEULIEZ	Friendly	100% électrique					
FIAT	Mini et small VP vans Phylla	hybride Dies/élec hybride Dies/élec concept citadine 0 émission					
FORD	Transit Connect Focus BEV	100% électrique 100% électrique		USA			
HONDA	Insight	hybride Ess/élec					
HYUNDAI	Elantra Sonata ? i10	mild-hybride full-hybride plug-in hybrid 100% électrique	en Corée	USA			
KIA	Cee'd Forte LPI Hybride	hybride hybride					
MERCEDES	Classe A Classe B 4X4 GLK Classe B Classe B E300 Bluetec Hybrid S300 Bluetec Hybrid C300 Bluetec Hybrid S400 Bluetec Hybrid ML 450 avec Siemens VDO S400 Bluetec Hybrid	électrique hybride hybride diés/élec hybride électrique hybride diés/élec hybride diés/élec hybride diés/élec hybride diés/élec hybride diés/élec hybride diés/élec					

Sources : sites des constructeurs, annonces, presse spécialisée

Marques	Modèles		2009	2010	2011	2012	2013
MITSUBISHI	iMIEV	100% électrique	Japon		Europe		
NISSAN	utilitaire	hybride					
	Altima hybride Nuvu ou Leaf	hybride 100% électrique		Japon USA	Europe		
OPEL	Ampera = Volt ?	hybride rechargeable					
PEUGEOT	BB1	concept électr					
	iOn (PSA/Mitsubishi)	100% électrique	Juil. Japon	Europe			
	308 hybride Hdi	hybride diés/élect					
	3008 Hybrid 4	hybride diés/élect					
	508 RC Hybrid4	hybride diés/élect					
	Partner Concept car RC 4P	100% électrique hybride diés/élect					
PORSCHE	Panamera 4portes	full hybride					
RENAULT	Fluence Z.E	100% électrique			3T Israel	Europe	
	Zoe Z.E	100% électrique				2T	
	Kangoo Be Bop ZE	100% électrique					
	Twizy Z.E	100% électrique			été		
SMART	Smart Electric Drive	électrique 2ème génération					
SUBARU	R1e	électrique					
TOYOTA	Auris	hybride					
	Prius III Hybrid X	hybride Ess/élect					
	Prius	hybride Ess/élect 100% électrique					
TRABANT	nT	100% électrique					
VENTURI	Eclectic	électrique	prés.				
VOLKSWAGEN	Lupo électrique	100% électrique					
	E-Up	100% électrique					
	Golf	hybride diesel					
VOLVO	C30 Recharge	hybride rechargeable + moteur thermique flex-fuel					
	C30 BEV	100% électrique					

Sources : sites des constructeurs, annonces, presse spécialisée

4.5. Trajectoires futures possibles

La rupture vers l'électrique semble incontournable à moyen terme, avec une diffusion plus ou moins rapide. En particulier, les pouvoirs publics français s'intéressent de près au développement des véhicules électriques et hybrides et mettent en place un plan d'actions pour parvenir « à faire de l'industrie énergétique et automobile française des leaders mondiaux ».

Fin 2009, les prévisions les plus récentes du développement des véhicules décarbonés oscillent selon les sources et les volontés/objectifs des constructeurs automobiles :

- Les ministères de l'Industrie et de l'Environnement estiment que, sous l'hypothèse d'une flambée du prix du pétrole, les ventes de véhicules hybrides et électriques représenteront 7% du marché en 2015 (dont 100 000 commandes de véhicules électriques aux collectivités et grandes entreprises), 16% en 2020 et 27% en 2025. Quant au parc, il est estimé à 2 millions en 2020 en France, et à 4,5 millions en 2025.
- Le cabinet PWC considère que le développement de ces véhicules dépendra de nombreuses conditions telles que soutien des gouvernements, harmonisation des normes et rapidité des progrès technologiques des batteries. Ces marchés représenteront 0,5% (0,4 million) et 4,5% (3,6 millions) respectivement pour les véhicules électriques et hybrides, de la production mondiale en 2015. L'Europe assurerait 20% de cette production, le Japon 48% et les USA 21%.
- Le cabinet Oliver Wyman, d'après l'étude E-mobilité 2025, considère pour sa part que la part des véhicules électriques sur le marché mondial restera marginale à 3% en 2025 contre 9% pour les véhicules hybrides.

Les experts et adhérents du Club des Énergies Nouvelles dans les Transports Terrestres du BIPE ont mené plusieurs ateliers de réflexion prospective "participative" aboutissant à un système d'analyse structurelle et de simulation à long terme des pénétrations des véhicules hybrides et électriques.

Un modèle de simulation combine plusieurs hypothèses d'évolutions, sur des variables clés identifiées comme structurantes, de l'avenir des véhicules hybrides et électriques : prix du pétrole, consommation des motorisations, vitesse de diffusion des nouvelles énergies, parcs roulants et mobilités en distance parcourue des véhicules roulants selon leur énergie, segment de gamme, usage, et selon l'âge du véhicule. Le BIPE a élaboré 3 scénarios différenciant sous contraintes des objectifs de la Commission européenne et de Facteur 4 sur la réduction des émissions de CO₂ : scénario tendanciel, scénario dualisation des marchés et scénario de rupture.

Dans le **scénario 1 « Au fil de l'eau »** le développement des véhicules hybrides et électriques est lent et surtout lié à un manque de lisibilité sur les avantages/inconvénients de la part des consommateurs.

La diffusion des voitures hybrides (4,5% du marché en 2020) et des voitures électriques (1% du marché en 2020) serait très lente, ce qui représenterait un parc de 0,5 million de voitures « décarbonées » en 2020 avec en particulier des hypothèses de prix du pétrole à 1€/L et une poursuite de la tendance récente concernant les paramètres de mobilité.

Scénario 2 : Innovation « push », dualisation des marchés on assisterait à une diffusion des voitures hybrides (14% du marché en 2020) et des véhicules à traction électrique (5,5% du marché en 2020) ce qui représenterait un parc de 1,5 million de voitures « décarbonées » en

2020, mais les objectifs de la Commission européenne et de Facteur 4 sur la réduction des émissions de CO₂ ne seraient toujours pas respectés dans la mesure où ce scénario ne suppose pas en parallèle de modification des comportements de mobilité.

Dans le **scénario 3 dit de Rupture** on assisterait à une diffusion très rapide des voitures hybrides (24% du marché en 2020) et des véhicules à traction électrique (15% du marché en 2020), ce qui représenterait un parc de 3,9 millions de voitures « décarbonées » en 2020. Dans ce scénario, pour que les objectifs de la Commission européenne et de Facteur 4 sur la réduction des émissions de CO₂ soient respectés il faut en outre faire l'hypothèse d'une flambée des prix du pétrole (montant à 3 € le litre d'essence), d'une mobilité décroissante (nombre de passagers/km de -1% en tcam) et de fortes réductions de la consommation des moteurs thermiques à 3 l/100 km.

4.6. Annexes : indicateurs et perspectives

4.6.1. Offre de motorisation dans le monde et consommation

Cet indicateur tend à rappeler l'implication des différents acteurs à travers le monde dans l'émergence de la problématique des véhicules hybrides et électriques.

Il apparaît que le Japon et les États-Unis concentrent la grande majorité des travaux de recherche dans ce sens.

Ces efforts de R&D permettent l'émergence d'un certain nombre de procédés plus largement diffusés à travers le monde, pour des performances et des principes variés. Le Japon, à l'image de Toyota, reste le pays le plus impliqué dans la transition technologique en matière de véhicule.

Faiblement impliquée dans le passé, la Chine semble aujourd'hui prendre la pleine mesure des enjeux économiques liés au développement du véhicule électrique. Ce pays pourrait ainsi largement accroître son implication dans la recherche de nouvelles solutions moteurs.

La variable de coût pourrait ainsi devenir largement discriminante, alors qu'aucune rupture n'avait pour le moment été ressentie.

4.6.2. Offre de véhicules intégrant un processus électrique

Devant la variété des technologies proposées et ayant pris conscience de l'enjeu stratégique que revêt l'émergence du véhicule électrique, la quasi-totalité des constructeurs est impliquée, et ce quel que soit le marché géographique cible.

Alors que les effets d'annonce se sont multipliés en faveur du véhicule hybride, mais pour des parcs qui restent limités malgré les marchés visés, la longévité de la crise pourrait faire reculer bon nombre d'échéances.

Le contrecoup lié à la sortie de crise pourrait être d'autant plus fort, et être l'occasion d'une refonte de la structure des parcs automobiles selon les nouvelles technologies proposées.

L'émergence d'un véhicule tout électrique à l'horizon de 5 ans deviendrait crédible.

À l'inverse, la crise a pu retarder les projets de recherche, provoquant de fait un recadrage des ambitions et un avènement du véhicule électrique plus lointain.

Enfin, l'évolution future des prix des carburants et de la taxation de ces derniers influencera fortement la part des véhicules électriques et hybrides dans les immatriculations.

4.7. Bibliographie

- Perspectives concernant le véhicule grand public d'ici 2030 - Jean Syrota - Centre d'analyse stratégique – 28 Septembre 2008.
- Systèmes embarqués : les clés pour l'automobile du futur - Communiqué de presse CEA Mondial de l'automobile 1^{er} Octobre 2008.
- Véhicules hybrides, quel avenir ? Institut français du pétrole 2005.
- Les nouvelles sources d'énergie miniatures pour applications nomades CEA, 21 Mai 2008.
- Véhicules électriques, Note de veille thématique, MINEFI/DGE, 2009.
- Les voitures électriques : enjeux techniques et perspectives d'une nouvelle mobilité respectueuse de l'environnement, Jérôme Perrin, Renault, 04/02/2009.
- Hydrogen and fuel cells as strong partners of renewable energy systems European Hydrogen Association.
- La guerre des batteries Le Point/Business Week 19 Février 2009.
- Les motorisations, quels progrès demain ? Marc Lalière 2009.

5. B5 – STOCKAGE ET RECHARGE ELECTRIQUE

5.1. Définition de la variable

Alors que les moyens de propulsion développés dans le cadre de la mutation des moyens de transports sont déjà très variés, les technologies incluses dans ces procédés sont également très diverses. En outre, la batterie concentre une bonne part de la R&D à déployer dans le cadre du développement du véhicule électrique. On compte ainsi bon nombre de technologies de stockage différentes pour un seul et même procédé. Toutefois, les différentes offres de stockage de l'énergie électrique, même si elles sont substituables entre elles, ne répondent pas aux mêmes critères de poids, de volume, de performance, de disponibilité de la ressource (certaines utilisent des ressources déjà peu abondantes, comme le cobalt, ou d'autres ont des gisements limités à terme, comme le lithium), et de respect des objectifs environnementaux (le cobalt reste un produit très toxique).

La problématique des capacités de stockage et recharge électrique a suivi celle des véhicules électriques et hybrides. Dès lors, elle reste très récente et les avancées techniques ne permettent pas encore l'émergence immédiate d'une alternative crédible (au titre de l'efficacité relative rendement moteur et autonomie) au véhicule essence ou diesel.

L'offre électrique technique concerne néanmoins un large éventail de technologies offertes par les différents équipementiers automobiles et autres fabricants de batteries.

5.2. Indicateurs pertinents

- Type(s) de batterie utilisé(s) et en R&D ;
- Modèle d'affaire développé.

5.3. Synthèse des évolutions passées et conséquences pour la filière automobile

- Aujourd'hui très concentré sur la technologie lithium-ion, le secteur automobile pourrait connaître une refonte complète de son modèle ;
- La période post-crise pourrait voir un bouleversement des tendances liées aux recherches en cours ;
- Hypothèses d'attrait renforcé à moyen terme pour les technologies limitant les difficultés d'extraction et de disponibilité : hydrogène, technologie Zinc-Air ;
- Hypothèse d'émergence des produits nanostructurés à plus long terme.

5.4. Rétrospective

5.4.1. Une offre variée plus ou moins développée

La problématique des capacités de stockage et recharge électrique a suivi celle des véhicules électriques et hybrides. Elle reste très récente. Pourtant, ces dernières années ont vu un élargissement assez important de la gamme des technologies proposées. Parmi elles, on compte des technologies vieillissantes, d'autres en plein essor, mais aussi certaines qui peuvent souffrir de leur trop grande jeunesse.

- **Les batteries nickel-cadmium** : anciennement très répandues dans le développement des véhicules électriques des groupes PSA et Renault, les batteries nickel-cadmium ont aujourd'hui été condamnées par la réglementation européenne sur l'utilisation des métaux lourds.
- **Les batteries au nickel-métal hydrure (Ni-MH)** : en raison de leur capacité à fournir une puissance élevée et à assurer un nombre important de cycles, les batteries au nickel-métal hydrure (Ni-MH) sont largement utilisées pour les applications hybrides à forts régimes et faible amplitude de cyclage.

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

- **Les batteries au lithium-ion** : dotées de qualités (conductivité et longévité accrue) qui font d'elles les technologies phares des offres hybrides et hybrides rechargeables (actuelles et à venir), les batteries au lithium-ion souffrent encore de certaines lacunes (risque d'échauffement, voire d'incendie) qui nuisent à son développement de masse.

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

La production de batteries lithium-ion tend à augmenter à moyen terme de façon exponentielle. Parmi les acteurs étrangers, on peut citer : Bosch, Evonik et Continental AG en Allemagne ; A123 Systems, Enerdel et Johnson Controls aux États-Unis ; GS Yuasa, Hitachi, NEC, Panasonic et Sanyo au Japon.

- **Les batteries lithium-ion au phosphate de fer** : en plus des performances élevées et de la bonne tenue en cyclage des batteries lithium-ion, la technologie qui couple le lithium-ion au phosphate de fer a l'avantage d'une meilleure sécurité intrinsèque et d'un coût réduit du matériau. En outre, il remplace l'utilisation abondante du cobalt, ressource rare et plus toxique.

Offre : Aux États-Unis, la société Valence technology, basée au Texas, commercialise déjà ce type d'accumulateur tout comme la société BYD en Chine. Pour sa part, le fabricant chinois DLX produira à partir de fin 2009 pour des acteurs encore indéterminés.

- **Les batteries au lithium-métal polymère** : elles cumulent les avantages d'être plus légères, d'une plus grande capacité (que les batteries composées de carbone) et plus sécuritaires (faible risque d'explosion). Toutefois, leur mise en application reste complexe du fait de contraintes techniques plus importantes (nécessité d'une température de fonctionnement proche de 80°, risque de courts-circuits internes).

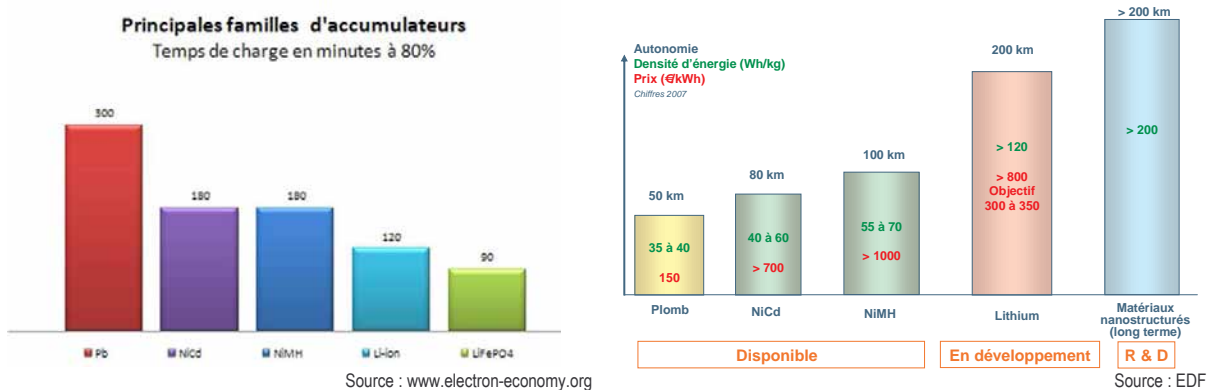
Offre : En France, la société BatScap, qui appartient au groupe Bolloré, développe cette technologie et a acquis en mars 2007 les actifs de la société canadienne Avestor, qui était la première à commercialiser des modules de forte capacité. Ailleurs, LG Chem produit des batteries lithium polymère pour le constructeur coréen Hyundai dès mi-2009.

- **Les batteries chlorure de sodium-métal :** brevetées dès 1975, elles n'ont eu de cesse d'améliorer à la fois leurs performances (deux fois supérieures aux batteries nickel cadmium) et leur fiabilité, mais restent pénalisées par une conductivité réduite.

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

Les caractéristiques technologiques liées aux capacités de stockage sont donc assez diverses, avec des propriétés variables. Les histogrammes ci-après démontrent bien le rapport et les différences que l'on peut mettre en avant suivant les différentes technologies à l'œuvre dans le monde de l'automobile électrique. Les différentes technologies rendent des performances très inégales à la fois en termes de puissance, mais aussi de capacité de recharge.

Graphique 13 : Familles d'accumulateurs et leurs caractéristiques



5.4.2. Un intérêt plus marqué pour deux technologies plus particulières : les batteries lithium-ion et la ressource hydrogène

Au regard de l'analyse déjà menée, nombre de technologies sont développées autour de la ressource lithium. La multiplication des offres actuelles ou futures prouve son véritable enjeu. Son intérêt actuel reste largement lié à ses propriétés intrinsèques (voir graphiques ci-dessus). L'optimisation du temps de charge et la plus grande autonomie en comparaison des autres produits à même usage confèrent une visibilité plus lointaine à la technologie lithium-ion, et lui donnent un avantage comparatif important. L'émergence soudaine de la ressource pose néanmoins quelques interrogations. Ainsi, les questions autour de son accessibilité, la durabilité de son exploitation et sa viabilité économique sont largement répandues.

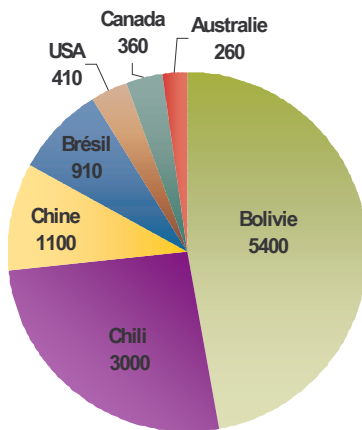
Les interrogations actuelles sont d'autant plus grandes qu'un rapport de force est en train de s'établir vis-à-vis des réserves disponibles. De nouvelles places fortes de l'énergie mondiale pourraient émerger, à en croire le niveau des réserves connues de lithium (voir sur ce point le

chapitre sur les métaux rares dans le chapitre relatif aux évolutions du contexte économique mondial). Cette situation pourrait être la source de nouvelles tensions géopolitiques, qui ternissent dès à présent les débouchés du véhicule essence ou diesel. Toutefois, à la différence de la ressource pétrolière, le recyclage du lithium offre une perspective à plus long terme.

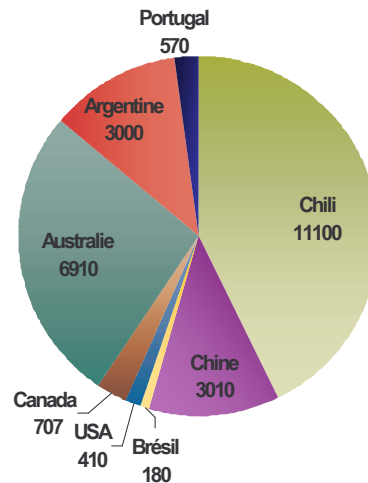
Forte d'une commercialisation de masse pour des petits équipements, la technologie lithium-ion équipe aujourd'hui les ordinateurs ou téléphones portables mais elle reste, en comparaison, très peu déployée par l'industrie automobile. C'est pourtant cette « expérience de fonctionnement » qui garantit le meilleur avenir à court/moyen terme à la technologie lithium-ion.

L'intérêt pour ces batteries est toutefois d'autant plus fort que durant les années 1990 et la première moitié des années 2000, cette technologie a fait l'objet d'un rythme de progrès technologique (densité d'énergie massique et volumique des batteries) d'environ 5 % par an, et a, dans le même temps, réalisé des gains de productivité (taux de décroissance du prix de ces batteries) d'environ 10 % par an.

Graphique 14 : Réserves de base en lithium en 2007 (Ktonnes)



Graphique 15 : Production en lithium en 2007 ((Ktonnes)



Source : USGS

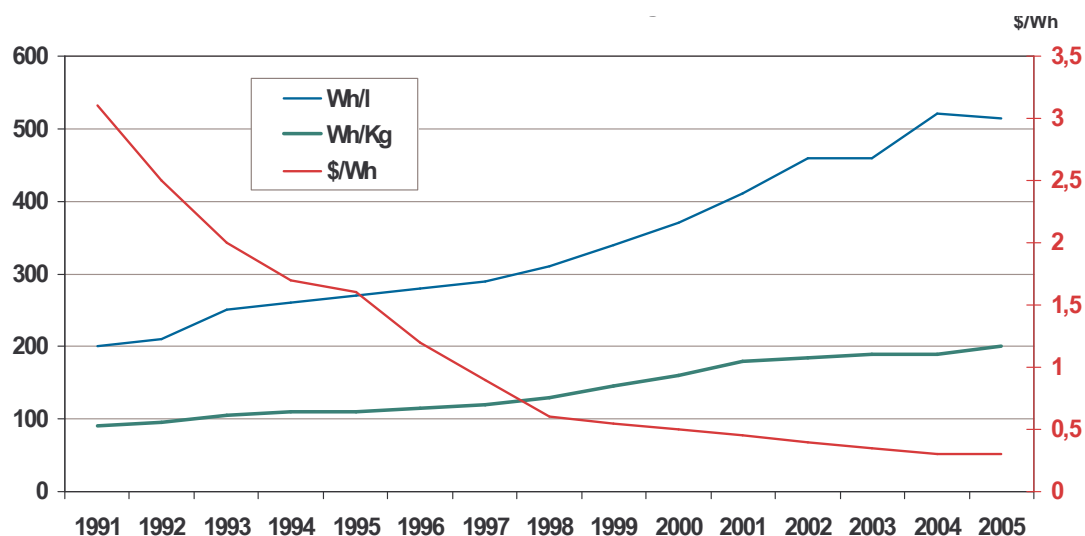
L'investissement de la recherche y a donc été important, au même titre que les résultats qu'elle a générés. Ces avancées ont ainsi permis d'accentuer largement la crédibilité de la batterie lithium-ion face à ses concurrents.

Le graphique de la page suivante illustre ces évolutions.

Il convient de rappeler par ailleurs que les bonnes perspectives de la ressource lithium interviennent dans un contexte automobile et économique mondial largement dégradé. De fait, nombre de résultats de recherche (**produits nanostructurés** entre autres) sont occultés par des acquis technologiques plus forts qui devraient permettre d'aborder la transition plus sereinement. Dans ce contexte, il ne semble pas exagéré d'anticiper des évolutions favorables aux produits plus complexes à moyen terme.

Confirmant la tendance d'une recherche intensive en devenir, **l'hydrogène** peut être considéré comme l'un des meilleurs exemples de l'état de la recherche pour le développement de solutions de stockage et de recharge électrique. Beaucoup de travail a été fait ces dernières décennies mais le progrès est encore à venir. Dans les six ou huit dernières années, de nombreux pays ont intensifié leurs efforts de recherche.

Graphique 16 : Évolution des batteries lithium-ion pour l'EGP (Électronique Grand Public)



Source : Mission "véhicule 2030", Jean Syrota

Comme il vient d'être démontré, **la disponibilité de la ressource va demeurer une problématique essentielle du développement de nombre de véhicules intégrant les nouvelles technologies** (lithium-ion par exemple). Identifié comme un moyen de répondre de façon efficace au problème, l'hydrogène représente depuis de nombreuses années un facteur de succès de l'émergence du véhicule tout électrique de par des propriétés techniques avantageuses. En outre, le haut niveau de recherche atteint permettrait de fournir une solution au problème récurrent de poids qui nuit largement à l'expansion de la technologie : un alliage de magnésium pourrait stocker des quantités importantes d'hydrogène tout en étant léger et ne prenant pas trop de place.

Ainsi, dans une hypothèse d'émergence plus rapide du véhicule électrique, l'hydrogène pourrait étendre considérablement ses parts de marché sur la technologie lithium-ion, du fait de capacités de ressources moins limitées.

L'intérêt porté à l'hydrogène ne doit cependant pas faire oublier le potentiel d'autant plus important de la batterie Zn-Air (Zinc-Air) qui étend considérablement l'horizon temporel du véhicule électrique, en éloignant lui aussi très largement les contraintes liées à la mise à disposition de la ressource. L'étude du principe Zn-Air est en cours afin de minimiser les coûts de mise en œuvre et d'en augmenter l'autonomie. L'émergence reste très attendue et devrait intervenir dans un délai relativement proche.

Au-delà de l'incertitude liée à la disponibilité de la ressource, les acteurs du véhicule électrique portent un intérêt bien particulier au coût et à la viabilité économique du procédé. C'est dans cette optique que la société Better Place vient d'annoncer en début d'année le déploiement d'un dispositif qui répond à bon nombre de problèmes pouvant nuire sensiblement au développement du véhicule électrique.

5.4.3. Le modèle économique de Better Place comme première amorce crédible vers le tout électrique

Alors que la question était posée depuis quelques années de la capacité des véhicules électriques à répondre au défi de l'autonomie et de la recharge des composantes, la société Better Place a été la première à proposer un modèle capable d'assumer bon nombre des contraintes de l'électrique pour un véhicule (autonomie et offre de recharge).

Ainsi, Better Place s'est d'abord associée à l'État d'Israël afin de proposer d'ici l'année prochaine un dispositif de recharge des véhicules électriques mais aussi une solution contre la faible autonomie des batteries. Le réseau routier sera maillé par un réseau de stations d'entretien capables de fournir des batteries de rechange, moyennant la souscription d'un abonnement dont le coût devrait varier selon les besoins de chacun. Par ce procédé, Better Place entend à la fois régler le problème d'autonomie mais aussi et surtout de coût lié à l'achat et à l'usage d'un véhicule électrique. En effet, la technologie électrique embarquée implique un surcoût, non négligeable pour l'acheteur, mais qui devrait entièrement être assumé par Better Place.

Les économies d'échelle liées à l'ampleur du réseau devraient en effet permettre de répercuter un prix raisonnable (de l'ordre de celui lié à l'usage courant d'un véhicule essence) aux utilisateurs. Reste un point majeur à intégrer par le projet Better Place, la normalisation à la fois des véhicules, mais aussi des techniques de ravitaillement, quand bien même cette problématique ne dépend pas de la seule société Better Place.

5.5. Trajectoires futures possibles

Aujourd'hui très concentré sur la technologie lithium-ion, le secteur automobile pourrait connaître une refonte complète de son modèle. La période post-crise pourrait voir un bouleversement des tendances liées aux recherches en cours :

- Hypothèses d'attrait renforcé à moyen terme pour les technologies limitant les difficultés d'extraction et de disponibilité : hydrogène, technologie Zinc-Air ;
- Hypothèse d'émergence des produits nanostructurés à plus long terme.

Dans le cadre du plan pour le développement de la filière véhicules électriques en France, le gouvernement a annoncé en octobre 2009 la mise en place de 75 000 bornes de recharge accessibles à tous d'ici 2015 pour arriver à 400 000 bornes à terme sur le territoire national (estimation de 2,5 bornes par véhicule). Les utilisateurs de véhicules électriques rechargeraient leur batterie à domicile, le plus souvent au cours de la nuit, mais avec 100 km d'autonomie et 50 km si la température descend à 0 degré. Les bornes de secours, nécessitant des temps d'immobilisation du véhicule de 1 à 2 heures, seraient installées sur la voirie ou sur les parkings des entreprises commerciales et les grandes surfaces.

Mais les différentes enquêtes auprès des ménages montrent que l'automobiliste **reste très attaché à l'autonomie de la batterie** et ce point risque d'être discriminant (d'après enquête ODA BIPE de juin 2009 « *Autonomie insuffisante aux seuils de 150 km et 250 km* ») ainsi qu'aux modes et temps de recharge (d'après enquête ODA BIPE de juin 2009 « *Peu d'intérêt pour un temps de recharge d'une heure et pour un point de recharge au domicile* »).

Dans les scénarios 1 « **Au fil de l'eau** » et 2 « **Innovation push** », l'accent est mis principalement sur l'autonomie de la batterie : de 150 km à 250 km respectivement pour les scénarios 1 et 2. Les clientèles visées seront dans un 1^{er} temps les entreprises publiques et les

collectivités locales, ce qui a un triple avantage : facilité d'accès aux points de recharge, expérimentation en temps réel et visibilité des véhicules dans la rue.

Dans le cadre du **scénario 3**, le développement des bornes de recharge rapide et le déploiement de modèles d'affaire innovants nécessiteront non seulement des aides des pouvoirs publics mais aussi une politique volontariste et de très fortes incitations de la part de toute la chaîne de valeur de la filière. Dans ce cadre, et avec l'évolution des technologies, l'autonomie pourrait atteindre 500 km.

5.6. Annexes : indicateurs et perspectives

5.6.1. Offre technologique de batteries

Cette variable rend compte de la réalité technologique dans laquelle le secteur automobile est plongé.

Elle intègre des technologies plus ou moins matures et permet le recensement des acteurs impliqués dans la filière.

Dans un contexte automobile particulièrement affecté et devant la recrudescence des technologies développées dans le cadre du véhicule électrique de demain, les agents de la filière semblent largement se concentrer sur l'émergence d'une technologie basée sur l'exploitation du lithium-ion. Les produits nanostructurés, comme d'autres alternatives (hydrogène notamment), semblent plus à même de répondre aux défis de long terme.

Leur expansion pourrait de fait induire une profonde rupture dans les modèles économiques d'ores et déjà initiés.

Outre les techniques de recharge, il conviendra également de repenser plus profondément la morphologie des véhicules sous l'effet de poids et de puissance sensiblement modifiés.

5.6.2. Développement des batteries lithium-ion

Établie autour des constats liés aux performances intrinsèques et à la disponibilité de la ressource mère, le lithium, cette variable démontre tout le potentiel offert par la technologie lithium-ion.

Elle rappelle par ailleurs l'expérience de l'utilisation d'un tel procédé pour d'autres applications et alternatives qui peuvent lui être opposées, dont l'hydrogène, les batteries Zinc-Air et les produits nanostructurés.

5.6.3. Développement des modèles d'affaires liés à la mutation technologique

D'aspect purement qualitatif, cette variable met en exergue le développement de l'offre annexe, indissociable des progrès technologiques en cours en matière de véhicules électriques et hybrides. On décrit ici le modèle développé par Better Place.

Alors que la première mise en fonctionnement du modèle développé par Better Place devrait intervenir dans le courant de l'année 2009, l'intérêt autour de celui-ci semble grandissant.

Si l'essai est concluant, le développement des véhicules électriques, via des technologies lithium vraisemblablement, pourrait prendre le pas sur toute autre forme de stockage de l'énergie. Le modèle permettrait entre autres aux constructeurs d'outrepasser la problématique liée à

l'autonomie des véhicules, principal frein au développement actuel de la batterie lithium. L'avantage concurrentiel pris par les batteries lithium allongerait de fait l'horizon de succès de toute autre alternative.

5.7. Bibliographie

- The trouble with lithium (Implications of future phev production for lithium demand) Meridian International Research, Janvier 2007.
- Impact of battery weight and charging patterns on the economic and environmental benefits of plug-in hybrid vehicles Ching-Shin Norman Shiau, Constantine Samaras, Richard Hauffe, Jeremy J. Michalek, Février 2009.
- La chasse au lithium est ouverte Usine nouvelle 19 Mars 2009.
- Shai Agasi, l'homme qui voulait réinventer la voiture ? Les Echos, 04/03/09.
- Véhicules électriques, Note de veille thématique, Minefi/Dge, 2009.
- La guerre des batteries Le Point/Business Week 19 Février 2009.
- Les motorisations, quels progrès demain ? Marc Lalière 2009.

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Part des défaillances selon les produits	10
Tableau 2 : Caractéristiques des véhicules hybrides.....	13
Tableau 3 : Classification des différents types d’hybrides	39
Tableau 4 : Lancements des modèles hybrides et électriques	41

LISTE DES GRAPHIQUES

Graphique 1 : Taux de croissance des composants électroniques par secteur	10
Graphique 2 : Degré de pénétration des équipements électriques et électroniques.....	12
Graphique 3 : Évolution des dépenses de R & D logiciels entre 2002 et 2015 de six secteurs industriels	18
Graphique 4 : Degré de pénétration des équipements électriques et électroniques.....	19
Graphique 5 : Taux d'installation des ESC dans les véhicules	21
Graphique 6 : Évolution de la masse des véhicules par type d'énergie en France (en kilogrammes).....	26
Graphique 7 : Évolution de la puissance moyenne (kW) en France.....	27
Graphique 8 : Ventes par classe de CO ₂ (%).....	28
Graphique 9 : Répartition des ventes par segment (<i>part en % du total des ventes de l'année</i>)	29
Graphique 10 : Revenu mondial généré par les nanotechnologies (<i>en milliards d'euros</i>)	30
Graphique 11 : Pénétration des nanotechnologies par secteur industriel.....	31
Graphique 12 : Nombre de brevets déposés par zone géographique.....	38
Graphique 13 : Familles d'accumulateurs et leurs caractéristiques.....	49
Graphique 14 : Réserves de base en lithium en 2007 (Ktonnes)	50
Graphique 15 : Production en lithium en 2007 ((Ktonnes)	50
Graphique 16 : Évolution des batteries lithium-ion pour l'EGP (Électronique Grand Public).....	51