

# PERSPECTIVES D'EVOLUTION DE L'AUTOMOBILE

par Robert Giraudon

Membre du Comité Transport du CNISF

*Note préliminaire : Cet article est une contribution libre qui n'engage en rien le CNISF dans sa réflexion en cours sur le sujet..*

## Résumé:

Que le CO<sup>2</sup> d'origine anthropique soit responsable ou non d'un changement climatique, une chose est certaine : il est le reflet de notre consommation des énergies fossiles, lesquelles ne sont pas renouvelables ! La production en atteindra rapidement un pic puis diminuera inéluctablement au cours de ce siècle. A l'échelle mondiale, le secteur des transports en consomme 20 % et le sous-secteur des transports routiers 17 %.

Les hydrocarbures, qui fournissent 40 % de l'énergie mondiale, sont utilisés à 39 % par les transports et à 31 % pour le seul sous-secteur routier. A moyen et long terme, l'énergie verra ses prix augmenter inexorablement. Il est donc impératif d'en restreindre notre appétit et de prévoir à terme le remplacement de celles d'origine fossile. Conscients de cette nécessité et de celle également impérative de la diminution de la pollution de notre atmosphère, notamment dans les agglomérations, les Etats font pression sur les consommateurs pour qu'ils changent leurs comportements et deviennent plus économes. Les constructeurs ont fait de leur côté de remarquables efforts dans ce sens et ont beaucoup travaillé à la diminution des émissions nocives et au rendement des moteurs des véhicules.

De nombreuses voies ont été explorées pour aller encore plus loin, certaines avec succès tandis que d'autres s'avèrent être des impasses. De toutes les recherches qui ont été effectuées, il ressort que les hydrocarbures liquides représentent de très loin la forme la plus dense de l'énergie et qu'ils sont de ce fait pratiquement incontournables pour les automobiles et ce pour encore des décennies.

Les consommations d'hydrocarbures peuvent s'exprimer indifféremment soit en nombre de litres au 100 km soit en grammes de CO<sup>2</sup> émis au km. Si la corrélation n'est pas rigoureusement exacte, elle est suffisamment forte pour que l'une ou l'autre soit utilisée.

Les constructeurs donnent pour les voitures des consommations moyennes urbaines, ex-urbaines et mixtes. Ces dernières sont établies sur la base d'une circulation à 65 % ex-urbaine et à 35 % urbaine. Or les statistiques montrent que l'utilisation réelle est juste à l'inverse avec une majorité de petits parcours de moins de 25 km. Cette constatation est extrêmement importante car c'est dans la circulation urbaine que les moteurs thermiques sont le moins performants et enregistrent les consommations les plus fortes. Celles-ci sont d'ailleurs, d'après les utilisateurs, bien supérieures aux chiffres avancés par les constructeurs. **C'est donc la diminution des consommations en milieu urbain qui apparaît comme la cible privilégiée des recherches à entreprendre pour diminuer les gaspillages d'énergie dans le secteur routier.**

Les petites citadines diesel constituent déjà une avancée dans ce domaine tandis que les luxueuses berlines surpuissantes sont une aberration surtout lorsqu'elles sont utilisées pour de petits déplacements quotidiens. Cependant, le gros des automobilistes souhaite avoir une voiture tous usages et les constructeurs ont de ce fait le souci de suivre les aspirations de leur clientèle. Telles sont les données du problème.

Parmi les solutions qui ont été proposées, certaines sont décevantes : Ainsi les biocarburants, sont confrontés au problème de la disponibilité des terres cultivables et entraînent dans certains pays tropicaux de graves détériorations de l'environnement. C'est le cas des huiles végétales en addition au gasoil sous forme de diester. Plus décevante encore est la production de bioéthanol à partir de denrées alimentaires qu'une envolée des prix de ces dernières a obligé de ralentir. D'autant plus que, outre un coût élevé, le bilan énergétique global montre que le recyclage du CO<sup>2</sup> n'est que partiel et que la quantité d'énergie fossile dépensée est au mieux, dans les pays tempérés, la même qu'en utilisant directement des produits pétroliers ! Il reste un espoir : la mise au point d'une utilisation rentable de la biomasse.

Une autre tentative consiste à utiliser comme carburant l'hydrogène dont la combustion ne rejette que de l'eau. En alimentant des piles à combustible on devait même atteindre des rendements élevés. Là encore on arrive à un bilan énergétique global désastreux : d'abord pour produire cet hydrogène, on réforme du gaz naturel, opération qui rejette du CO<sup>2</sup>. Ensuite c'est un des gaz les plus difficiles à compresser ou liquéfier, ce qui est indispensable pour le mettre à bord des véhicules. Au total on aura dépensé avant cette mise à bord, 70 % de l'énergie qu'il contient sans compter l'alourdissement des véhicules par le contenant et une sécurité aléatoire. Il est possible que cette voie soit utilisée plus tard lors de l'avènement des générateurs nucléaires de 4<sup>ème</sup> génération. Ce sera peut-être une solution pour le prochain siècle mais elle n'est pas d'actualité.

Des esprits inventifs ont proposé des voitures propulsées par des moteurs à air comprimé. Quand on connaît la dégradation énergétique qui résulte d'une compression de l'air à 200 ou 300 bars dans des bouteilles qui ont un poids non négligeable, on touche là une pure aberration thermodynamique.

Enfin pour certains, la panacée est la voiture électrique : silencieuse, sans rejet polluants, elle semble idéale pour la circulation en milieu urbain. La technologie des batteries a fait d'immenses progrès en particulier avec les batteries lithium-ion. Malgré ces progrès, la densité énergétique reste 50 fois inférieure à celle d'un hydrocarbure liquide. Il en résulte un poids important de ces batteries avec comme corollaire un rayon d'action limité pour les voitures qui en sont

équipées. De plus les batteries *Li-ion* n'ont pas encore une sécurité suffisante pour une diffusion tous publics, elles coûtent très cher et si les réserves mondiales de ce métal paraissent suffisantes, il faudrait une très forte accélération de la production mondiale qui actuellement ne dépasse pas 25 000 t/an pour satisfaire à la demande. Enfin, il ne faut pas perdre de vue que l'électricité est majoritairement produite dans le monde avec des centrales électriques fonctionnant au charbon qui rejettent énormément de CO<sup>2</sup>, tout cela pour un rendement au kWh à la roue inférieur à celui d'une voiture diesel! De l'avis de la plupart des experts, la voiture tout électrique n'a qu'un avenir limité pour un marché de niche : son usage restera confiné aux petits parcours urbains, de préférence là où l'électricité est d'origine nucléaire, et encore à condition que son prix devienne abordable.

Quelles sont alors les voies prometteuses ? En premier lieu, l'incitation des automobilistes par les pouvoirs publics à s'orienter vers des voitures d'une puissance raisonnable est un premier pas car il n'y a nul besoin de plusieurs centaines de chevaux pour rouler à 130 km/heure. Certes on n'éliminera pas totalement la demande pour de luxueuses et lourdes berlines par une clientèle aisée soucieuse de standing social ou amoureuse de belles mécaniques mais le prix élevé de ces voitures tant à l'achat qu'à l'utilisation en diminuera encore le nombre et donc l'impact énergétique. La tendance sera donc vers des voitures plus légères mais tous usages qui constituent d'ores et déjà le gros des ventes en Europe. Dans les pays émergents, la tendance devrait être vers des mini-voitures bon marché comme la Nano indienne (bien qu'en termes de rendement celle-ci ne soit pas exemplaire) mais ce n'est pas du tout ce que reflète les études de marché effectuées par les constructeurs qui constatent que la demande actuelle va essentiellement vers des véhicules aux normes européennes, puissantes et bien équipées.

Parmi les solutions technologiques prometteuses, l'éventail actuel est le suivant :

**Les voitures fonctionnant au GPL ou au GNC** : l'avantage se trouve dans de faibles rejets polluants et un bon rendement des moteurs thermiques. Les inconvénients restent dans une sécurité insuffisante des réservoirs, surtout pour le GPL, des réseaux de distribution encore limités –palliés par la bicarburation- le poids des contenants du gaz et l'énergie dépensée pour sa compression. La question est de savoir ce qui est le plus intéressant d'un fonctionnement de la voiture avec du gaz ou de la production d'un hydrocarbure liquide à partir de ce gaz (voie GTL) ?

**Les diesels *common rail* ou *HDI*** : largement diffusés, ils représentent déjà une avancée notable. La fonction *Stop & Start* introduite par *PSA* constitue un nouveau progrès surtout pour la circulation urbaine.

**L'apparition des voitures *Hybrides*** : Elles allient les avantages d'une motorisation thermique à celle d'une voiture électrique en permettant de diminuer la taille et donc le poids des batteries sans que le rayon d'action soit pénalisé. Dans cette famille, on distingue les *Hybrides parallèle* dans lesquels moteurs thermique et électrique sont couplés et les *Hybrides Série* qui sont des voitures électriques dont les batteries sont alimentées par un groupe électrogène. La première catégorie est représentée par la *Toyota Prius* – qui fonctionne également en *Hybride Série* - déjà diffusée à plusieurs centaines de milliers d'exemplaires et qui montre les consommations les plus basses dans sa catégorie des compactes. Ses performances ont encore été améliorées avec la *Prius III* qui est dotée d'une fonction *Plug in* (capacité de recharger la batterie sur le réseau) ce qui lui permet de rouler en électrique au départ. L'inconvénient de cette solution est dans la complexité mécanique qui entraîne un surcoût à l'achat et un prix de fonctionnement élevé (les batteries – des *Ni-MH*, par sécurité- doivent être changées tous les trois ans).

Dans la deuxième catégorie on trouve des voitures électriques dont le rayon d'action est augmenté par l'adjonction d'un petit groupe électrogène qui recharge la batterie. Celle-ci conserve un poids important et donc on retrouve dans ce type de véhicule – illustré, entre autres, par la *Cleanova II* de la *SEV* - une partie des inconvénients de la voiture électrique.

Avec le même principe mais avec une architecture complètement différente, on a une *Hybride série* où le moteur thermique n'est plus un accessoire mais a une puissance voisine de celle du moteur électrique. La batterie a une taille réduite et ne sert plus que comme réservoir d'énergie pour lisser les appels de puissance. De ce fait le moteur thermique ne tourne plus que par intermittence et toujours à un régime unique avec un rendement optimum. La *GM* a présenté un prototype – la *Chevrolet Volt* - qui a cette configuration à laquelle a été ajoutée une fonction *Plug in*. Cette *Volt* affiche une consommation mixte de 1,5 L/100 km pour un véhicule tous usages d'une longueur de 4,40 m. On a là un prototype très avancé et qui répond le mieux aux aspirations de la clientèle. Il devrait encore garder l'essentiel de ses avantages même si on remplaçait la batterie *Li-ion* prévue par une batterie *Ni-MH*.

**Enfin, une dernière percée technologique**, qui n'a pas été suffisamment mise en lumière, a été la présentation au Salons de Shanghai et de Versailles 2008 de la *Roue Active Michelin*. Cette *RAM* loge dans une roue de 30 kg un moteur électrique de 30 kW refroidi par eau, un frein à disque et une suspension électrique gérée par ordinateur avec un temps de réponse de 3/1000èmes de seconde qui donne au véhicule une assiette et une adhérence incomparables. Dans une voiture équipée de cette *RAM*, il n'y a plus ni boîte de vitesse, ni différentiel, ni cardans, ni amortisseurs. On peut regretter que cette innovation révolutionnaire n'ait été présentée que sur des prototypes de voitures électriques (la *WILL* de chez *Heuliez*) ou à pile à combustible alors que **le mariage des technologies de la Volt et la RAM pourraient préfigurer la voiture de demain.**

*Ce résumé a été publié dans le n° 205 (mars 2010) de la revue TEC*

o

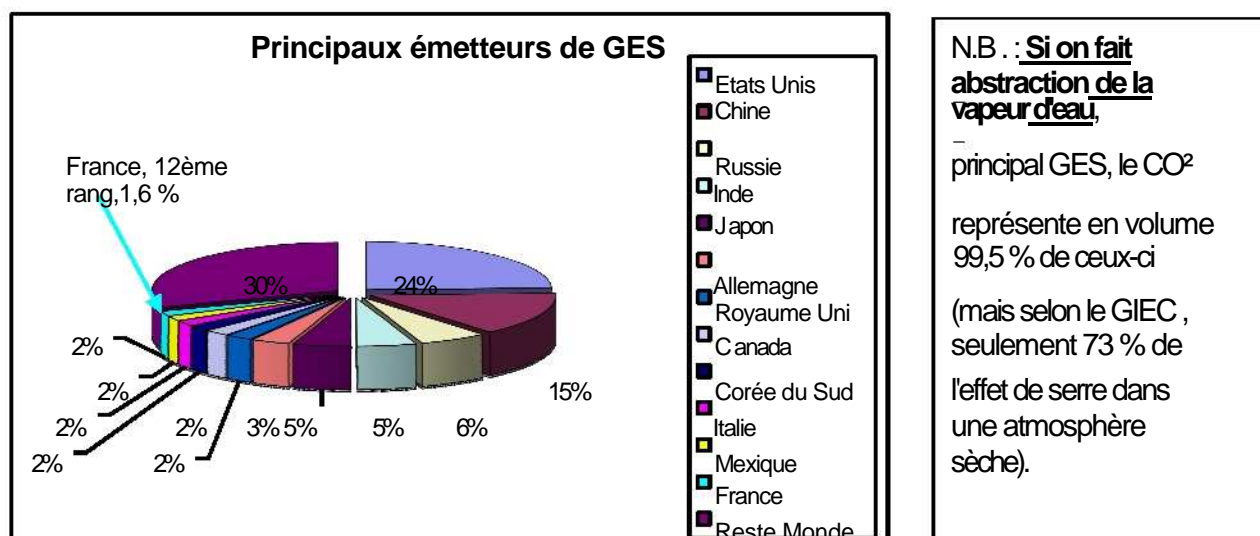
o o

## I) Le contexte :

En cette période où tous les médias font un battage sans précédent pour que dans tous les domaines nous limitions nos émissions de CO<sup>2</sup>, en particulier dans le secteur des transports réputé grand pourvoyeur de ce gaz devenu maléfique, il est intéressant de voir quelles sont les réactions des utilisateurs de ces automobiles, mises au banc des accusés et de ceux qui les construisent.

*Si dès maintenant nous ne restreignons pas drastiquement nos émissions de CO<sup>2</sup>, nous irions vers des catastrophes climatiques dont nous ne soupçonnons pas l'ampleur et qui mettront en danger la survie de l'humanité tout entière.* C'est tout au moins ce que prédit le GIEC, émanation de l'honorable ONU. Que ces projections alarmistes se réalisent ou non dans les prochaines décennies fait débat : bien que le GIEC affirme que ses conclusions sont celles de la communauté scientifique internationale, de nombreux scientifiques, appartenant ou non au GIEC, en contestent les bases et ne leur donnent au mieux que valeur de présomptions.

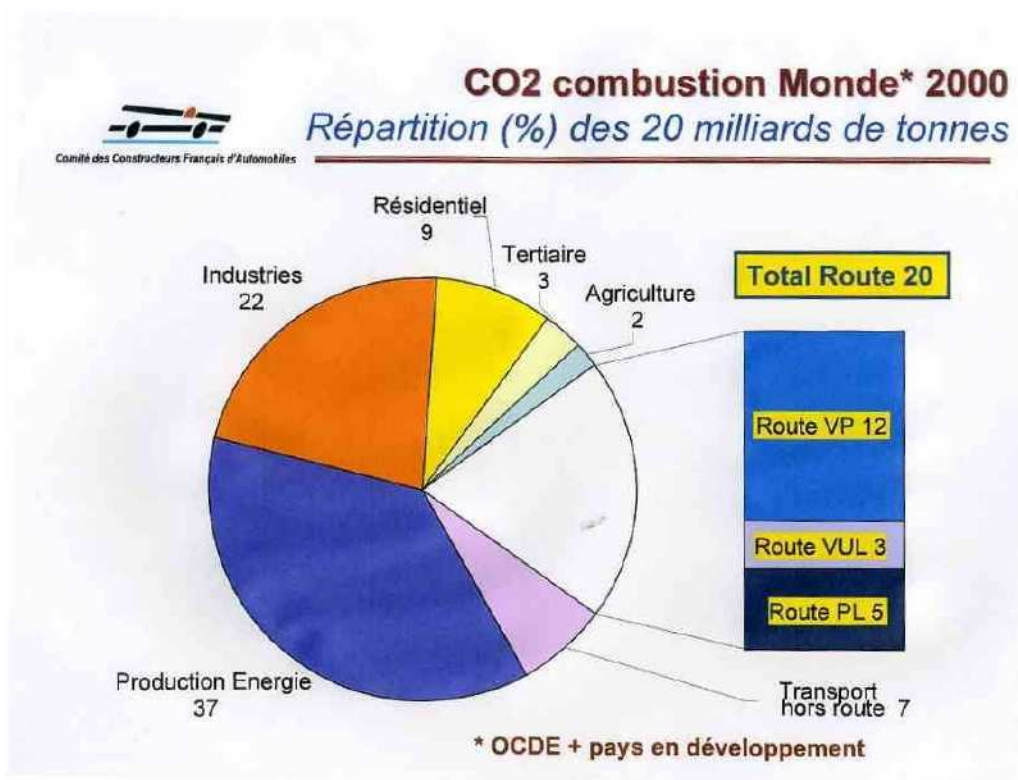
Quoi qu'il en soit, une chose est certaine: **les émissions anthropiques de CO<sup>2</sup> sont le reflet de notre consommation des ressources énergétiques fossiles** et nous savons que celles-ci, non renouvelables, commenceront à s'épuiser dès le milieu de ce siècle au rythme actuel de leur exploitation : le pic pétrolier sera atteint entre 2020 et 2030 selon *J-R Bauquis*<sup>1</sup>, et le pic du charbon vers 2060 selon *J-M. Jancovic*<sup>2</sup>. Il est donc de notre intérêt à tous de limiter nos émissions de CO<sup>2</sup> bien que, comme le fait remarquer *C. Gérondeau*<sup>3</sup>, il est probable que les très gros émetteurs que sont la Chine et l'Inde n'entendent pas ce message et continueront à puiser sans restriction dans les énergies fossiles de la planète pour assurer leur croissance. Ce n'est néanmoins pas une raison pour ne pas essayer d'aller vers cette limitation, surtout de la part des pays industrialisés et en particulier des Etats-Unis qui est le pays le plus énergivore du monde.



Ce graphique qui date du début des années 2000, n'intègre pas la croissance des émissions de la Chine qui tendent à se rapprocher de celles des Etats-Unis

## II) La part des TRANSPORTS :

Dans la totalité des émissions de CO<sup>2</sup> causées par l'activité humaine, celles attribuables aux transports représentent 20 % :



4

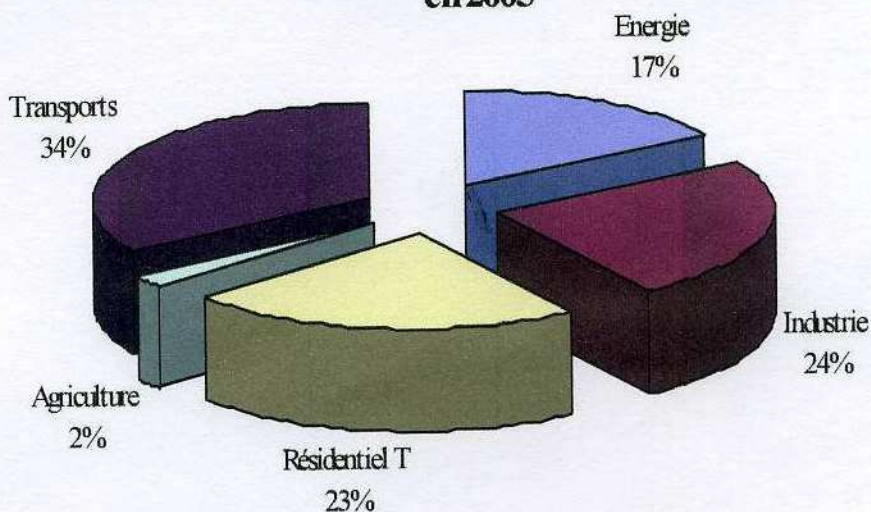
D'après A. Douaud

En 2007, les émissions anthropiques de CO<sup>2</sup> (d'origine fossile) ont atteint 27 Gt. On admettra que la répartition dans les différents secteurs est restée à peu près identique jusqu'à aujourd'hui. Les transports sont essentiellement utilisateurs de carburants liquides et dans une faible proportion de carburants gazeux, tous tirés de l'exploitation pétrolière (98 %) à part une proportion de biocarburants encore marginale à l'échelle mondiale (<1%). Le charbon, gros émetteur de CO<sup>2</sup>, ne rentre que pour une très petite part dans le secteur du transport : directement pour l'alimentation des quelques locomotives à vapeur encore utilisées et indirectement d'une manière plus importante pour l'alimentation électrique des locomotives dans les pays où l'électricité est produite à partir du charbon (60 % des centrales thermiques). Le transport ferroviaire intervient encore mais pour une faible proportion dans le bilan CO<sup>2</sup> du secteur du fait de la traction diesel ou diesel électrique partout là où les réseaux ne sont pas électrifiés (de l'ordre de la centaine de millions de tonnes à raison de 60 kg CO<sup>2</sup>/km). Le transport aérien quant à lui n'est responsable que de 2,5% des émissions de CO<sup>2</sup> et le transport maritime de 1,24%. En 2000, le transport routier était donc responsable d'environ 17% des émissions de CO<sup>2</sup>, proportion qui est sensiblement la même en 2007 et en conformité avec les prévisions de l'AIE.

En ce qui concerne la France, la part du secteur transport est augmentée (en pourcentage) du fait de la quasi suppression du charbon pour la production de son électricité essentiellement d'origine nucléaire (y compris celle qui alimente le réseau ferroviaire).

France :

### Poids des différents secteurs dans les émissions de CO<sub>2</sub> en 2005



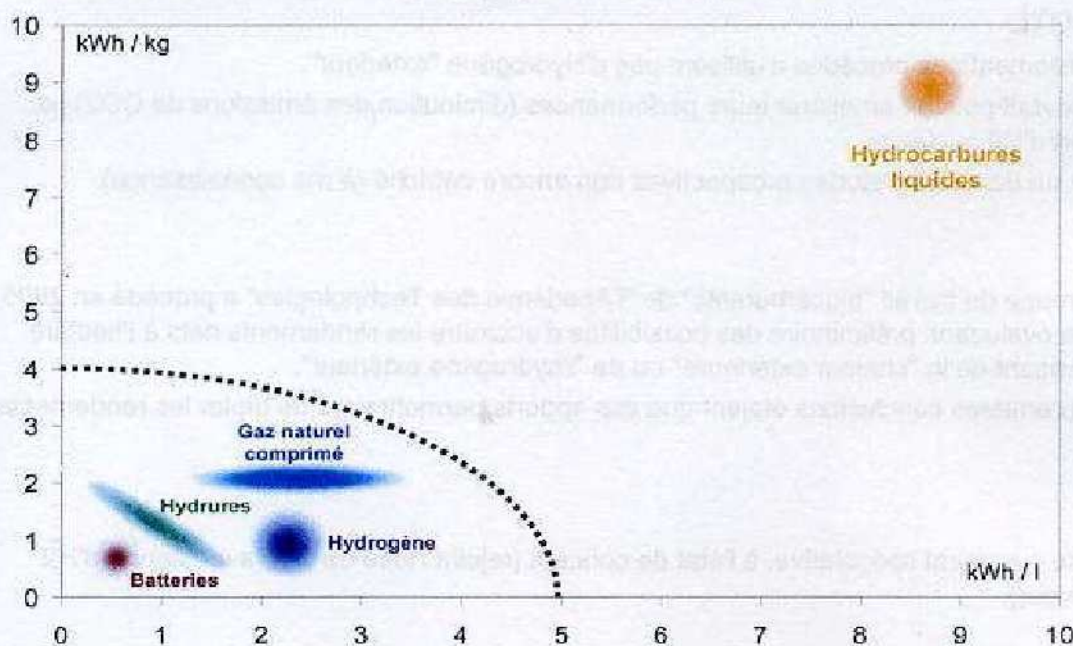
A l'échelle mondiale, le secteur des transports (personne et marchandises) est donc le 3<sup>ème</sup> émetteur de CO<sub>2</sub> et le premier consommateur d'hydrocarbures (39%) dont 31 % pour le transport routier. Ce dernier s'avère donc être l'un des principaux champs de recherche visant la diminution de nos consommations d'énergies fossiles. Pour l'atteindre, différentes voies ont été envisagées telles que le développement des transports ferroviaire, fluvial et par autoroutes maritimes. Ce sont là des réflexions d'un autre ordre, qui sortent du présent cadre, et dont d'ailleurs les conclusions sont que le transport routier continuera à rester largement prépondérant à l'avenir<sup>11</sup>.

### III) Une forme d'énergie incontournable :

Les hydrocarbures liquides, quelque soit leur origine sont et resteront pour longtemps, à moins de percées technologiques révolutionnaires, la forme la plus concentrée d'énergie et comme telle la plus appropriée pour les véhicules non liés à un réseau électrique (ce qui est encore plus vrai pour les avions).

« **La densité énergétique est le concept économique clé.** » J-R Bauquis<sup>1</sup>

## Les hydrocarbures liquides : une compacité énergétique inégalée



Gaz naturel comprimé : réservoir acier ou composite  
Hydrogène : liquide ou comprimé de 5000 à 10000 PSI en réservoir composite

PRB / VL 2003

45 - Cercle des Actionnaires - Pierre-René BAUQUIS - 26 Novembre 2006 - Paris La Défense



Les hydrocarbures liquides étant donc incontournables pour longtemps encore, la question est de savoir comment peut-on en réduire la consommation ?

### IV) Lien entre consommation des véhicules et émissions de CO<sup>2</sup> :

Ce lien paraît évident mais est-il rigoureusement exact ?

Sur 64 véhicules (VP) pris au hasard, la moyenne des émissions par litre de carburant s'avère être de 25,6 g/l mais avec un écart type de 1,83 qui reflète un échantillon assez hétérogène.

On a un résultat bien meilleur en ne prenant que des véhicules d'un seul type comme ceux à motorisation diesel moderne (injection directe à haute pression) : sur 35 modèles appartenant à 16 marques différentes la moyenne s'établit à 26,46 g/litre avec un écart type ramené à 0,31 (valeurs extrêmes 25,38 et 27). Cette moyenne est naturellement un peu plus élevée car les carburants diesels sont plus riches en carbone. Sur 20 modèles à essence de 13 marques différentes, la moyenne tombe à 24,03 g/litre mais avec un écart type de 1,31 qui reflète la diversité des carburants utilisés (E98, E 95, proportions diverses d'éthanol) et des carburations (injections directes ou indirectes, moteurs comprimés ou non, etc.). Enfin on a sorti de ces statistiques les modèles hybrides car les techniques et les objectifs visés sont trop différents : pour 7 modèles la moyenne s'établit à 25,73 g/litre mais avec des extrêmes qui vont 23,62 à 34 g/litre et encore en excluant les prototypes les plus atypiques.

Théoriquement, le taux d'émission de CO<sup>2</sup> s'obtient en multipliant 26,0 g/100 km par la consommation mixte pour la classe la plus homogène des véhicules diesel. Les valeurs données par les constructeurs sont légèrement plus fortes que celles que donne ce calcul (coefficient moyen de 1,02 avec un écart type de 0,01). Pour les véhicules à essence on prend une valeur de 22,8 g/100km mais les écarts sont plus grands. Ces émissions de CO<sup>2</sup> ont fait l'objet d'un classement qui est rappelé ci-dessous et qui est la base des *bonus malus* pour les émissions carbone :



En conclusion, on considérera que malgré les petits écarts constatés, consommations de carburant et émissions de CO<sub>2</sub> ont des significations équivalentes pour un objectif de recherche d'économies des hydrocarbures liquides.

## V) Consommation et pollution :

Les progrès technologiques réalisés dans les 40 dernières années ont déjà permis de réduire dans des proportions très importantes les consommations (et donc les émissions de CO<sub>2</sub>) ainsi que les autres pollutions générées par les véhicules (VL et PL) ... **mais pas le poids des véhicules !**

« [...] Les normes européennes (EURO 1 en 1993, EURO 2 en 1996, EURO 3 en 2000, EURO 4 en 2005), EURO 5 très prochainement imposent une diminution graduelle des émissions polluantes (oxydes d'azote, monoxyde de carbone (CO), benzène et autres CH, ozone, microparticules, etc.).

Une voiture particulière à essence construite en 2000 (norme EURO 3) émet 26 fois moins de monoxyde de carbone et 31 fois moins d'oxydes d'azote, de composés organiques volatils (benzène, etc.) qu'une voiture construite dans les années 1970. La norme EURO 4 (appliquée depuis le 1er janvier 2005) a encore divisé par deux les taux maximaux autorisés.

De même une voiture particulière diesel à la norme EURO 3 émet 94 fois moins de monoxyde de carbone, 20 fois moins d'oxydes d'azote, de composés organiques volatils (benzène, etc.) et 5.5 fois moins de microparticules qu'une voiture construite dans les années 1970. La norme EURO 4 a encore divisé les taux maximaux autorisés par 1,3 pour le monoxyde de carbone, par 1,9 pour les oxydes d'azote, les composés organiques volatils et par 2 pour les microparticules ». <sup>6</sup>

Néanmoins ces progrès remarquables sont ralentis par la présence dans le parc automobile de véhicules anciens non conformes aux dernières normes :

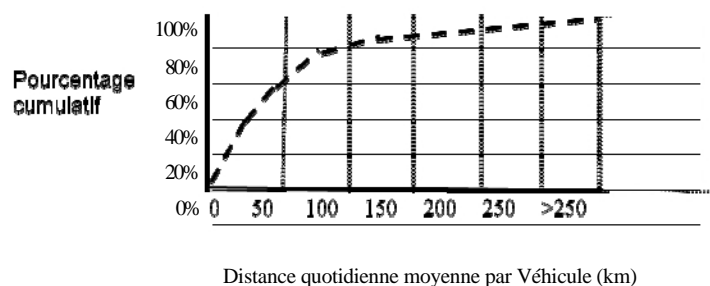
« [...] En 2001, les véhicules construits avant 1990 étaient responsables de 60 % de la pollution alors qu'ils représentaient moins de 20 % de la circulation. **Or plus de 25 ans sont nécessaires au renouvellement total du parc automobile**, durée qui devrait s'allonger avec l'accroissement de la durée de vie des véhicules (la moitié d'entre eux devrait maintenant durer plus de quinze ans). » <sup>6</sup>

Un autre facteur va en sens inverse des améliorations de rendement obtenues : une croissance irrésistible du parc mondial de véhicules qui va de pair avec une urbanisation croissante de la population mondiale, elle-même en augmentation constante.

Enfin, une composante essentielle de la consommation des véhicules (et des pollutions qui lui sont liées) est d'une part le comportement des conducteurs et d'autre part l'usage qu'ils font de leurs véhicules :

- En ce qui concerne la façon de conduire, celle-ci influe beaucoup sur la consommation et il est donc difficile d'avoir des chiffres rigoureusement représentatifs pour un usage moyen : ainsi la *Renault Logan* diesel présentée l'an dernier en Inde ne consommait que 71 g/100km de CO<sub>2</sub> sur un circuit étudié et avec un chauffeur maison mais 97g/100km en parcours normalisé.
- Des études effectuées sur les types et la longueur des déplacements montrent que ceux-ci sont majoritairement urbains et périurbains avec des distances inférieures à 25 km :

Distribution cumulative des trajets



Source: 1990 Nationwide Personal Transportation survey

Figure 9. Distribution cumulative des trajets quotidiens personnels (USA)<sup>20</sup>

Selon une autre source<sup>5</sup> les déplacements urbains sont responsables de 41 % des émissions de CO<sub>2</sub> dues au transport routier et les déplacements périurbains de 26 %, soit au total 67% se répartissant entre 65 % pour les véhicules particuliers, 30 % pour les véhicules utilitaires, 3 % pour les transports en commun et 2 % pour les deux-roues.

Or, « [...] les distances parcourues à chaque déplacement étant faibles, le moteur n'a pas le temps d'atteindre la température de fonctionnement optimale. A froid, l'huile est visqueuse et les pots catalytiques inefficaces. Démarrer avec un moteur froid augmente la consommation de 50 % au cours du premier kilomètre et les émissions de polluants sont de dix à quinze fois plus élevées qu'à chaud. »<sup>6</sup>

## VI) Comment les constructeurs évaluent-ils les consommations? :

Sur une statistique de 120 véhicules, il s'avère que les constructeurs à quelques petits écarts près, considèrent uniformément qu'un véhicule, quelque soit sa catégorie (citadine, routière ou familiale) **réalise 35 à 36 % de son kilométrage en zone urbaine et 64 à 65 % hors zone urbaine. C'est exactement l'inverse de ce que donnent les statistiques** qui viennent d'être citées ! Bizarrement, deux véhicules n'obéissent pas à cette règle : la *Toyota Prius Hybride* et la *Honda Civic Hybride* pour lesquelles la circulation citadine ne serait respectivement que de 12,5 % et 14 % alors qu'on aurait pu penser que c'était dans cet environnement que ces voitures étaient favorisées.

Il résulte de ceci que les consommations mixtes sont en fait notablement plus importantes que celles qui sont affichées :

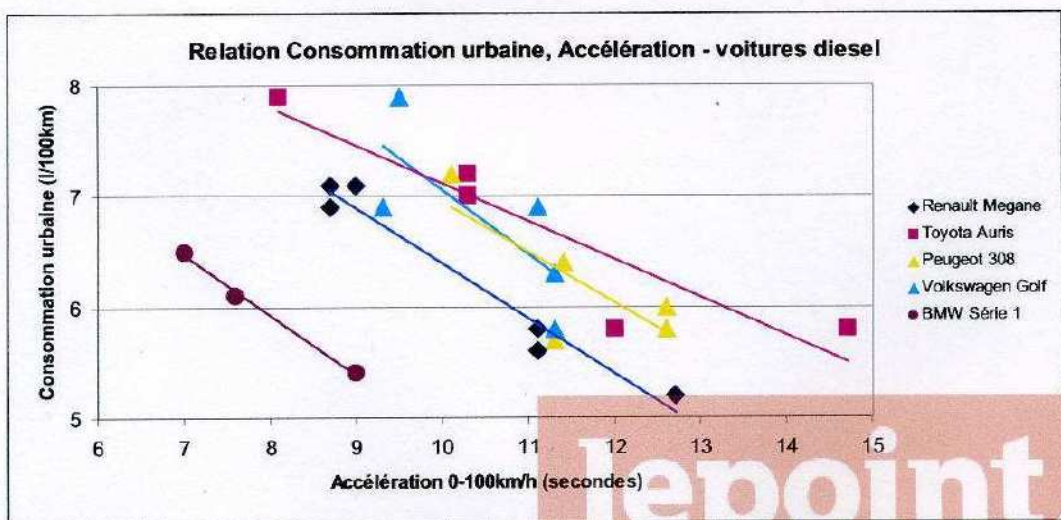
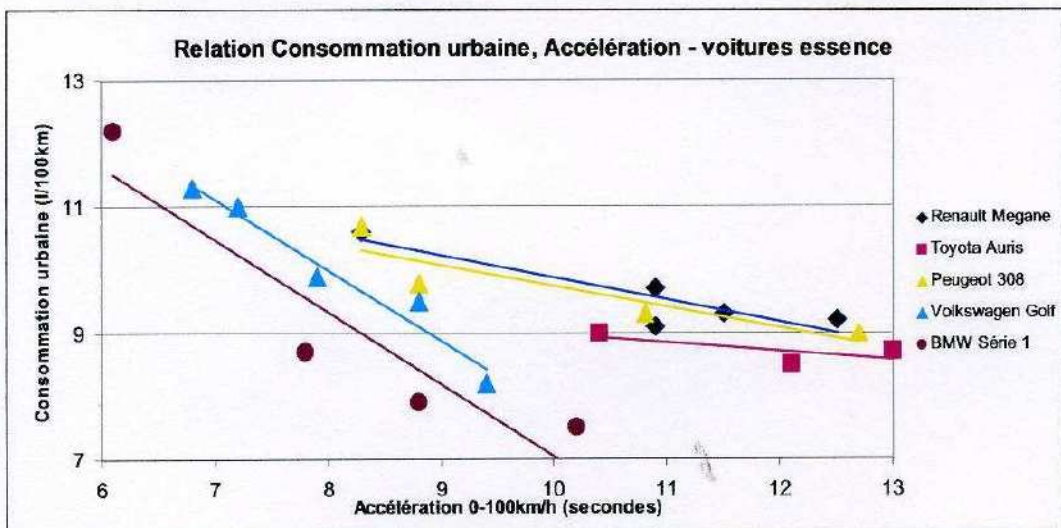
Catégories de véhicule	Echantillon (Nbre de véhicules)	Consommation Mixte (L/100km) moyenne Constructeurs	Consommation Mixte (L/100km) Moyenne recalculée	Ecart moyen (L/100 km)	Extrêmes (L/100 km)
Citadines <sup>1</sup>	20	6,2	7,3	•1	0,23 à 3,2
Petites <sup>2</sup>	20	4,7	5,3	0,6	0,4 à 0,6
Compactes <sup>3</sup>	30	5,8	6,5	0,9	0,9 à 1,4
Familiales <sup>4</sup>	30	6,4	8,4	2,0	1,0 à 3,8
Routières <sup>5</sup>	22	7,9	9,4	•5	1,3 à 1,8

(Source <sup>6</sup> après retraitement)

*Remarques :*

- 1) Cet échantillon est mal ciblé car très hétérogène : sous le nom de citadines ont été groupés des véhicules à essence et diesel, de tailles et de puissances très variées qui vont de la petite Smart Diesel (3,6 l/100 km) à de puissantes BMW à essence de 2, à 3 litres de cylindrée ayant une consommation mixte recalculée dépassant les 11 l/100 km.
- 2) Cette classe est beaucoup plus homogène et ne comporte que de petites voitures diesel qui sont les vraies citadines.
- 3) Dans cette catégorie avaient été regroupées des voitures diesel à vocation mixte route et ville. On y rajouté deux modèles hybrides de la même taille, la Toyota Prius et la Honda Civic Hybrid qui bien qu'à essence, s'avèrent être les plus économiques (4,7 L et 5 L au 100 km en consommation mixte recalculée), juste devant la Citroën C4 HDI 1400 cc (5,1 l/100 km). La soustraction de ces hybrides de l'échantillon ferait remonter la moyenne des consommations de seulement 0,1 litre.
- 4) Les familiales sont toutes des diesels et les écarts suivent en gros ceux des puissances et des volumes.
- 5) Les routières sont toutes des diesels et leurs consommations élevées sont le tribut payé à la puissance des moteurs.

Cette approche ne rend néanmoins que très imparfaitement compte de la réalité : Un usager se plaint que sa C4 Ti 1,6 neuve donnée pour 9,8 l/100 km en circulation mixte, consomme en réalité 15 L, un propriétaire d'une 307 HDI note une consommation mixte supérieure de 2 à 3 litres à celle annoncée et un essayeur professionnel d'une Polo Blue relève une consommation mixte qui passe en pratique de 3,9 L affichés à 6,3 L au 100 km ... Enfin, les bouchons récurrents aux heures de pointe autour des grandes agglomérations ne sont évidemment pas pris en compte dans le calcul des consommations normalisées. Les graphiques ci-après, extraits du rapport J. Syrota<sup>10</sup>, en donnent la vision constructeurs, déjà assez parlante :



Source : CAS d'après données constructeurs (juillet 2008)

Les écarts deviennent gigantesques quand on regarde ce qui se passe pour les PL (Poids Lourds) :

## ***Impact congestion sur consommation***

**Hypothèse: Maxi-code 440 ch PTRA : 40 tonnes- Circulation sur sol plat**

Conditions	Conso sur 100 km
Fluide 75 km/h constant	34 litres
Congestion Moyenne	160 litres
Congestion Forte	360 litres

Source: **RENAULT TRUCKS**

**CNISF Paris 08 1210 2005**

**Un autobus urbain consomme 50 L/100km, soit le double d'un camion de même tonnage**

De tout ce qui précède, il ressort que ce sont les voitures les plus puissantes et les plus lourdes qui consomment le plus et que les voitures diesel, notamment à injection directe à haute pression, sont

celles qui consomment le moins dans une même classe de véhicules. **Jusque là, il n'y a rien qui ne soit connu de tous.** En revanche, **il apparaît clairement que c'est la circulation urbaine et périurbaine qui est une des causes majeures des grands gaspillages d'énergie dans les transports et cela quelque soit le type de véhicule. Cette constatation permet de définir le domaine où doivent s'orienter en priorité les recherches d'économies d'énergie pour le secteur routier.**

## VII ) Les recherches qui s'avèrent être des impasses :

Diverses voies qui semblent sans avenir, sauf peut-être à très très long terme, ont été préconisées pour éviter que les véhicules consomment des hydrocarbures fossiles.

**1) Les biocarburants** Le but recherché dans ce cas est double : s'assurer une certaine indépendance vis-à-vis des pays producteurs de pétrole et recycler le CO<sup>2</sup> émis pour ralentir le changement climatique :

**1.1 La filière bioéthanol :** l'ajout d'éthanol à l'essence augmente la consommation. Ainsi une Citroën C4 Ti dont la consommation mixte est de 7,8 l / 100km avec du E95 passe à 9,1 l/100km avec du E85 (données constructeur). Quand on sait que pour produire un litre d'éthanol (du champ à la distillerie) il faut consommer 0,8 litre de pétrole, et que seule une partie du CO<sup>2</sup> est recyclée biologiquement, on arrive (en France) à un bilan total dans lequel on a consommé plus de pétrole et rejeté plus de CO<sup>2</sup> dans l'atmosphère qu'en roulant au E95 !<sup>8</sup> Dépasser les 5% (et a fortiori les 10 %) d'éthanol dans l'essence contribuerait en outre à restreindre dramatiquement les surfaces dédiées aux cultures vivrières (c'est d'ailleurs ce qui se passe au Brésil où cette filière a été largement développée malgré un rendement de la canne à sucre 4 fois supérieur à celui de la betterave). De plus la production de bioéthanol en Europe n'est rentable qu'au prix de subventions aux agriculteurs et d'un abaissement de la TPP sur le E85. Le développement de la filière bioéthanol a conduit à l'échelle mondiale à une envolée des prix des denrées alimentaires et obligé ses tenants à faire machine arrière<sup>3,7</sup>.

*Il reste un espoir, une filière de 2<sup>ème</sup> génération dans laquelle l'éthanol serait produit de façon économique à partir de la biomasse (voies ignée et/ou biologique) et non plus à partir des cultures vivrières. De nombreuses études sont en cours mais n'aboutiront pas avant plusieurs années sur le plan industriel.*

**1.2 La filière diester :** L'ajout d'huiles végétales retraitées au gasoil (huile de colza ou de tournesol en France, huile de palme dans les pays tropicaux) semble économiquement plus défendable (rendement de 7 t/ha pour le palmier à huile) que la filière éthanol mais trouve elle aussi sa limite dans les surfaces agricoles qui peuvent lui être consacrées. En Indonésie et Malaisie la déforestation à outrance pour la plantation de palmiers à huile a conduit à une dégradation irréversible des sols<sup>9</sup>.

**2. L'hydrogène et les piles à combustible :** Utiliser l'hydrogène comme carburant paraît à première vue une solution idéale puisque sa combustion ne rejette que de l'eau. Si en plus, on l'utilise dans des piles à combustible, on atteint, avec les meilleures, un rendement *énergétique* de 50 à 60 %, bien supérieur aux meilleurs diesels (30 %) ou moteurs à explosion (20%). Les problèmes commencent avec sa production : 95 % de l'hydrogène produit aujourd'hui l'est par reformage du

gaz naturel avec de la vapeur d'eau à haute température suivant la réaction  $\text{CH}_4 + 2 \text{H}_2\text{O} \rightarrow 4\text{H}_2 + \text{CO}_2$  (3 fois le coût du matériel de base). Pour les écologistes, c'est le serpent qui se mord la queue ! Les plus fanatiques préconisent d'enfouir le  $\text{CO}_2$  ainsi créé dans des formations géologiques poreuses et étanches, ce qui compte tenu de l'énergie nécessaire à la compression et au transport, aggrave encore la dépense énergétique nécessaire pour le reformage. D'autres préconisent la voie de l'électrolyse : celle-ci, beaucoup plus onéreuse, nécessiterait des centrales dédiées à cette production, capables de donner une alimentation constante en ampérage et en voltage.. Mais les problèmes ne s'arrêtent pas là ! L'hydrogène ne peut être transporté par les gazoducs actuels car, en vertu de la loi de Graham, il traverse facilement les parois des ses contenants et il nécessite donc des gazoducs spéciaux. Reste, tant pour le transporter que pour sa mise à bord des véhicules, à le compresser ou le liquéfier. Nouveau problème : l'hydrogène est un des gaz les plus difficiles à compresser et à liquéfier (- 253°C et 12kWh/kg) ! Il nécessite beaucoup plus d'énergie pour une compression à 200 bars que le gaz naturel et 15 fois plus que l'air. Comprimé à 700 bars, il stocke, dans un réservoir de 125 litres, 3 fois moins d'énergie qu'un même volume d'hydrocarbures liquides et à cette pression ce réservoir devient fort dangereux, pèse 100Kg et coûte 1 000 € Les risques d'explosion sont encore plus grands que pour le *GPL* qu'on a presque abandonné pour cette raison. L'hydrogène stocké dans des hydrures métalliques se heurte aux mêmes handicaps de poids et de coûts prohibitifs. Liquéfié, il nécessite une isolation thermique qui alourdit encore plus le réservoir et le rend encore plus onéreux. Au bout de la chaîne, l'hydrogène à bord aura perdu, à un coût extravagant, plus de 70 % de l'énergie qu'il contient, ce que ne compense pas, et de moind le meilleur rendement des piles à combustibles qui restent encore encombrantes et très chères (10 fois plus qu'un moteur thermique classique notamment à cause des catalyseurs actuels qui sont en platine). Dans l'état des techniques disponibles, **faire marcher des véhicules à l'hydrogène est un non-sens énergétique et économique**. Une appréciation que ne démentent ni *J. Syrota*<sup>10</sup>, ni *C. Gérondeau*<sup>3</sup>, ni *P-R Bauquis*<sup>1</sup> ni le *CNISF*<sup>11</sup>. Ceci d'autant plus que les ressources en gaz naturel sont encore abondantes et sont régénérées en partie par le manteau (partie de l'écorce terrestre sur laquelle flotte la lithosphère). Pour un avenir encore lointain, on envisage un retour à la production d'hydrogène par électrolyse, ou encore soit par décomposition de l'eau à haute température, soit par pyrolyse de la biomasse, grâce à une énergie bon marché fournie par des centrales nucléaires de 4<sup>ème</sup> génération (réacteurs à *Très haute température*). Cet hydrogène aura des usages accrus dont l'hydrogénation des hydrocarbures lourds et peut être les transports. Ce sera le problème du prochain siècle.

**3. La voiture électrique :** Pour être plus précis, il conviendrait de dire *la voiture uniquement électrique*. Ce n'est pas une nouveauté et on en a fabriqué alors même que l'automobile n'était encore qu'au berceau (cf. *La Jamais contente* de *Camille Jenetzy* en 1899). Le problème des voitures électriques a toujours été et est encore aujourd'hui, celui des batteries : malgré les nets progrès réalisés avec celles de types *nickel/métal-hydrures (Ni-MH)* et surtout *lithium-ion* par rapport aux vieilles batteries  $\text{Pb-SO}_4\text{H}_2$  ( cf. *Annexe 1*), elles restent lourdes et encombrantes et n'ont qu'une capacité encore modeste : celle-ci, exprimée en énergie massique est comprise entre 30 et 200 Wh/kg environ, alors que la densité d'énergie des carburants liquides (essence, gazole) dépasse 10 000 Wh/kg, ce qui représente 50 fois celle des meilleurs accumulateurs actuels (cf. le graphique des densités énergétiques de *P-R. Bauquis* reproduit plus haut). Même pour un véhicule allégé dans sa structure, l'autonomie ne dépasse guère une ou deux centaines de kilomètres: par exemple, celle de la *Mitsubishi i-mev* n'est que de 160 km en cycle urbain à une vitesse moyenne de 25 km/h (véhicule actuellement testé au Japon pour une commercialisation prévue en 2009).



### Mitsubishi i MIEV

**L x l x h (m) :** 3,39 x 1,47 x 1,60

**Poids à vide :** 1 080 kg

**Vitesse maximale :** 130 km/h

**Autonomie :** 160 km

**Temps de charge :** 80 % de la charge en trente minutes avec le « quick charger », ou de sept à quatorze heures avec une simple prise de courant domestique.

Le projet *Bluecar* de *Bolloré-Pininfarina*, revendique quant à lui une autonomie de 250 km et une vitesse de pointe de 130 km/h. Une multitude d'autres prototypes de voitures électriques ont récemment vu le jour y compris un modèle japonais à huit roues (contenant les 8 moteurs) à 217 000 €- <http://www.eliica.com/> - et pouvant atteindre 370 km/h ! Son autonomie n'est pas précisée. *J. Syrota*<sup>10</sup> fait remarquer que si on intègre le fonctionnement des équipements habituels (phares, essuie-glaces, dégivrage, radio, climatisation, etc.) cette autonomie peut être réduite de moitié.

Le temps de recharge complète d'une batterie au lithium est au moins 500 fois plus long que le remplissage d'un réservoir d'hydrocarbures de 50 litres et va de 6 à 14 heures sur une prise électrique 250 V standard. Les promoteurs des véhicules électriques envisagent pour pallier cet inconvénient des *racks* de batterie échangeables dans des stations service équipées à cet effet.

« En outre, le véhicule électrique doit supporter un coût environ double de celui d'un véhicule thermique conventionnel. L'une des raisons vient du fait qu'il nécessite l'introduction d'une batterie de grande capacité (au minimum une dizaine de kWh) dont le coût est au minimum d'environ 500 \$/kWh, ce qui en fait un composant qui compte pour quasiment 10 000 \$ dans le prix de revient d'un véhicule » (*J. Syrota*<sup>10</sup>). Pour être plus précis, ce coût va de 300 \$/kWh pour une batterie *Li-ion* chinoise à sécurité non garantie, à 800/1000 \$/kWh pour une batterie sécurisée. Le cours du lithium est passé de 350 \$/t en 2003 à 3000 \$/t en 2008 ce qui traduit une grande difficulté de la production à faire face à une demande en très forte croissance (les ressources mondiales exploitables sont évaluées entre 11 et 16 millions de tonnes, la production mondiale actuelle culmine à 25 000 t/an et il faut 140 g de Li par kWh de batterie soit de 3 à 7 kg de lithium par véhicule. Toutefois ce lithium est recyclable). Enfin, si ces batteries *Li-ion* ou *Li-polymère*, qui offrent la plus grande densité énergétique et la plus forte énergie spécifique (cf. *Annexe 2*), ont permis une amélioration très sensible des capacités des véhicules électriques, elles n'en restent pas moins délicates à charger avec des risques d'explosion qui, même avec une sécurisation électronique, ne sont pas nuls. C'est pour toutes ces raisons que *Toyota* pour sa *Prius* et *Peugeot* pour commercialiser sa *3008 Hy*, ont finalement opté pour des batteries *Ni-MH*, malgré leur énergie spécifique (Wh/kg) trois fois moindre.

Pour en terminer avec la voiture électrique qui est l'objet d'un grand engouement pour tous les chantres de la menace climatique que constitue l'accroissement anthropique de la teneur en CO<sup>2</sup> de l'atmosphère, il convient maintenant de faire un bilan énergétique des émissions de ce gaz pour les différents types de véhicules. Ce bilan est résumé dans le tableau suivant :

## RENDEMENTS ENERGETIQUES GLOBAUX COMPARES

### Voitures traditionnelles et électriques

VOITURES Source énergie	A ESSENCE **	DIESEL**	ELECTRIQUE	ELECTRIQUE	ELECTRIQUE
CENTRALES THERMIQUES modernes			40%		
CENTRALES THERMIQUES anciennes				30%	
CENTRALES NUCLEAIRES					30%
RESEAU			87%	87%	87%
CHARGEUR			80%	80%	80%
BATTERIE			80%	80%	80%
MOTEUR électrique			85%	85%	85%
MOTEUR thermique	20%	30%			
PUISSANCE A la roue	87,5%	87,5%			
<b>FINAL</b>	<b>18%</b>	<b>27%</b>	<b>19%</b>	<b>14%</b>	<b>14%</b>

\* L'énergie dépensée pour l'extraction-production, la préparation et l'acheminement des combustibles n'a pas été prise en compte (14,9% par exemple en ce qui concerne les hydrocarbures selon J-M Gires<sup>12</sup>)

\*\* A la pompe

Il en ressort qu'en termes d'énergie fossile globale dépensée de la source à la roue, les véhicules électriques font beaucoup moins bien que les véhicules diesel et à peine mieux que les véhicules à essence et encore seulement quand l'électricité est produite par une centrale thermique moderne !

En termes d'émissions de CO<sub>2</sub>, on arrive à la même conclusion sauf en ce qui concerne les centrales nucléaires.

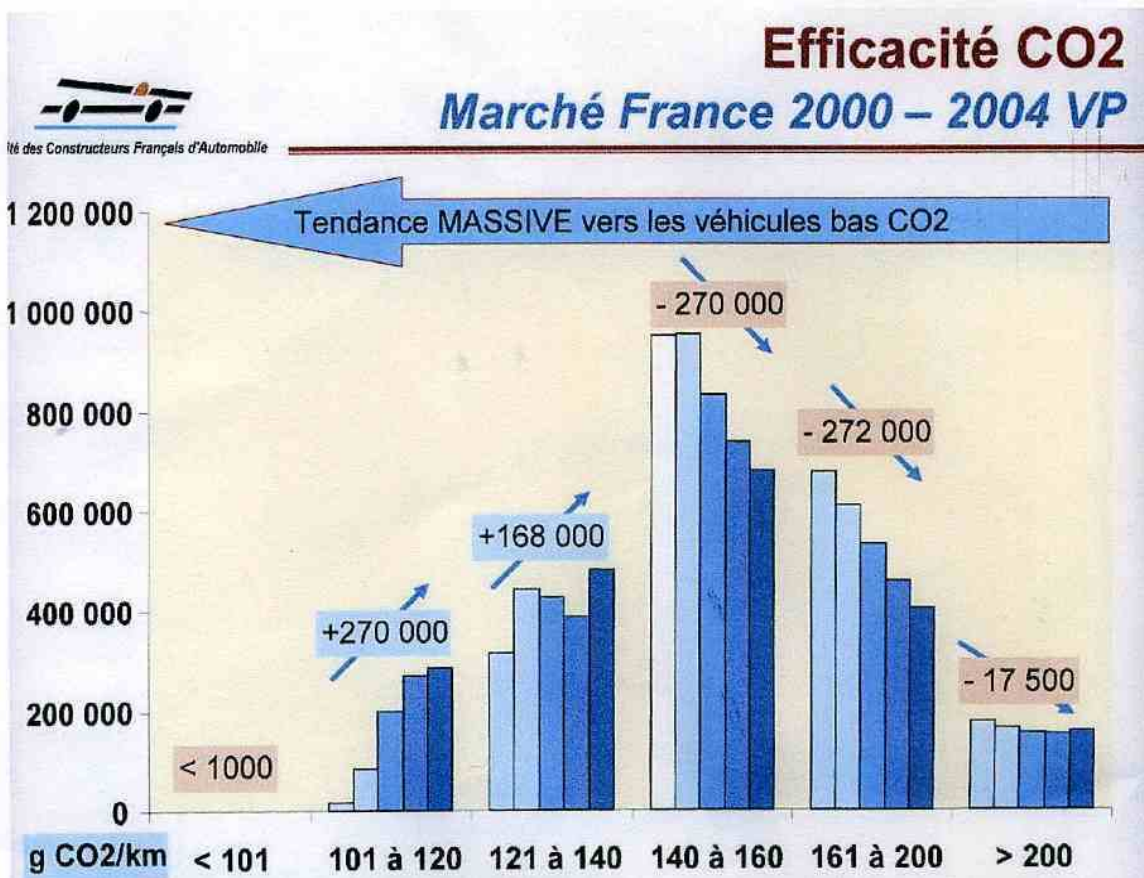
**. En conclusion, dans l'état actuel de la technique, les voitures électriques coûtent cher, tant à l'achat qu'à l'entretien, ont des performances médiocres, n'ont aucun avantage en termes d'économie des énergies fossiles sauf quand l'électricité qu'elles utilisent est produite par des centrales autres que les centrales à flamme. Elles présentent comme avantage une réduction des pollutions sonore et atmosphérique en milieu urbain, cette dernière étant seulement externalisée quand l'électricité est d'origine fossile. Les estimations actuelles les plus optimistes leur attribuent pour l'avenir 10 % du marché mondial de l'automobile et ce à condition que leur prix baisse significativement ou que leur production soit subventionnée, ce qui est un choix de politique économique.**

(voir aussi les références 1, 3 et 11).

**4. La voiture à air comprimé** : L'idée de promouvoir des voitures à air comprimé est un défi aux lois de la thermodynamique ! Quand on sait quelle quantité d'énergie est dépensée en chaleur perdue pour atteindre des taux de compression de l'ordre de 300 bars ou plus, que cette énergie est généralement obtenue à partir de centrales thermiques, que les réservoirs d'air comprimé ajoutent du poids au véhicule, qu'il faudrait construire des réseaux de distribution spécifiques, que l'autonomie de tels véhicules est forcément limitée, on peut se demander comment une telle solution a pu être envisagée à moins qu'on ne dispose de stocks d'air comprimé non utilisés ...

## VIII ) Les démarches et technologies prometteuses :

1. *L'évolution des mentalités* : Le public s'oriente de plus en plus vers des modèles qui consomment moins<sup>4</sup> :



Selon l'ADEME<sup>13</sup>, la tendance s'accroît : 58% des véhicules essence vendus en 2008 ont des émissions inférieures à 140 g/km de CO<sub>2</sub> (ils étaient 38% en 2007 après que leur pourcentage ait plus que doublé en 7 ans). Toutefois, la vente des véhicules diesel de moins de 130 g/CO<sub>2</sub>/km est en baisse ; en revanche il s'est vendu 27 % de moins de 4x4 en 2008 par rapport à 2007.

Cette tendance est salutaire. Plusieurs facteurs y ont contribué : la hausse du prix des carburants à mi-année en 2008 d'une part et l'instauration du *bonus malus* institué par le Grenelle de l'Environnement (sur une proposition de *J-M Jancovici*) d'autre part. Il reste cependant des progrès à réaliser, notamment pour faire entrer dans le public, et notamment dans la classe aisée, la notion que l'usage de puissantes voitures n'est, la plupart du temps, pas nécessaire (exemple : prendre un 4x4 - dont certains dépassent les 300 CV - pour amener les enfants à l'école ...). Il y a là un seuil qui sera difficile à franchir tant la voiture est pour certains un moyen d'afficher son statut social (certaines capitales africaines comptent plus de grosses Mercedes que des capitales européennes !) et pour d'autres correspond à des fantasmes enracinés dans l'histoire de l'automobile. Certains constructeurs, qui réalisent le gros de leurs bénéfices sur les grosses et luxueuses berlines, n'encouragent, pas cette révision des mentalités même s'ils atteignent parfois de remarquables rapports puissance / consommation. La presse ne joue pas non plus le rôle qu'on aimerait lui voir jouer et lors des salons, focalise l'attention du public sur des modèles prestigieux et énergivores (voire en *annexe 3* les commentaires journalistiques sur le prototype *Kizashi 2* de *Suzuki* dont on peut se demander quelle est l'utilité alors que dans la plupart des pays la vitesse est limitée ?). Il restera toujours une clientèle fortunée qui n'hésitera pas à investir des sommes considérables pour des voitures hors du commun. Les prix demandés en restreignent le nombre et donc l'impact sur le bilan global des dépenses d'énergie. Pour les autres, c'est à la puissance publique qu'il appartient d'orienter le marché dans le

bon sens tant par la propagande que par des mesures fiscales appropriées - comme cela est en cours,- tout en tenant compte de certains besoins spécifiques (familles nombreuses, gros rouleurs, etc.)

**2. GPL et GNC :** « Le **Gaz de Pétrole Liquéfié** est un mélange de butane et de propane, liquide à température ambiante sous une pression relativement faible. Il est utilisé comme carburant en bicarburation avec l'essence ; comme la composition du GPL n'est pas stable, des difficultés de réglage sont apparues, notamment pour limiter les émissions de NOx. Le véhicule à GPL est disponible depuis de nombreuses années (environ 150 000 exemplaires sont en circulation en France) et il bénéficie d'incitations financières sur l'investissement et la taxation du carburant. Son développement **a été handicapé par quelques accidents** qui ont stoppé sa promotion commerciale en France, en dépit de ses aspects positifs »<sup>10</sup> dont un bon rendement des moteurs.

Le **GNC** (Gaz Naturel comprimé) appelé aussi *GNV* (Gaz Naturel pour voitures) est celui qui est distribué par *GDF*, comprimé à 200 bars et mis dans des bouteilles semblables à celles utilisées pour la plongée sous-marine. Les voitures qui en sont équipées sont ajustées pour une bicarburation essence/gaz. Les risques d'explosion sont moindres qu'avec le GPL (auto- inflammation à 540 °, pas d'effet *bleve*<sup>18</sup>) et il n'y a pas ou peu de rejets polluants (NOx, CH et particules). Les inconvénients sont le volume et le poids du contenant, un coût plus élevé du véhicule et l'énergie dépensée pour la compression du gaz. Presque tous les constructeurs offrent cette option sur certains de leurs modèles et plusieurs centaines de milliers de véhicules en sont équipés et roulent actuellement en Europe et en Amérique. **La question qui se pose est qu'est ce qui est le plus rentable ou prometteur : fabriquer des véhicules adaptés à cette bicarburation et étendre le réseau de distribution ou bien faire de l'essence à partir du gaz naturel ou du méthane issu de la biomasse (voie dite GTL) ?**

**3. Les véhicules hybrides :** Ils représentent une des tentatives les plus intéressantes pour marier les besoins les plus fréquents des utilisateurs : une circulation urbaine plus économique et une circulation routière non pénalisée. Cependant tous les hybrides ne correspondent pas à cet objectif et certains s'en éloignent même carrément.

Classification des hybrides (réf. <sup>14</sup>) en fonction de l'importance de la partie électrique et de la façon dont elle est interconnectée avec le moteur thermique:

- **Les Stop & Start** promues par *Citroën* sur ses *C1* et *C3*: on les trouve maintenant sur d'autres marques telle la *Mini Cooper* de *BMW*: démarreur et alternateur sont couplés dans une unité réversible qui possède la capacité de couper automatiquement le moteur thermique lors des arrêts aux feux tricolores, dans les bouchons, etc.
- **Les classiques électriquement boostés**: Le principe consiste à utiliser une traction classique plus des moteurs électriques qui sont installés sur les roues arrières et sont alimentés par une batterie chargée par un alternateur couplé sur le moteur thermique. On obtient ainsi un appoint de puissance pour améliorer les reprises. Ce concept a été très étudié pour de puissants modèles de la *GM*. Cette technologie est utilisée chez *BMW*, *Ford* et *GM*. Si l'objectif est la recherche d'un gain de puissance pour une meilleure adhérence, les économies d'énergie sont alors complètement perdues de vue.
- **Les Stop&Start boostées** (*Mild Hybrid* ou *Urban Hybrid* chez *PSA*): Elles ajoutent au système *Start & Stop* un freinage régénératif par récupération de l'énergie cinétique du véhicule lors des ralentissements. Cette technologie est aussi couramment utilisée dans les 2 catégories suivantes.
- **L'Hybride série**: C'est en réalité une voiture électrique dotée d'un groupe électrogène. Le moteur thermique ne fait qu'alimenter un générateur électrique qui **peut donc tourner à régime optimal**. De plus, il n'y a pas de pertes mécaniques dans la transmission. Les batteries (et/ou les super-capacités) permettent de stocker l'énergie et de rouler en permanence en "tout électrique". Pour les plus perfectionnées, le freinage est régénératif. Suivant l'importance relative donnée aux moteurs thermique et électrique, on a soit une voiture dont le rayon d'action est augmenté par un petit moteur thermique qui fonctionne en permanence pour recharger la batterie à partir d'un certain niveau de sa décharge, soit une voiture dont le moteur thermique a une puissance voisine de celle du moteur électrique lequel fonctionne alors par

intermittence selon les appels de puissance. La *Chevrolet Volt* appartient à cette dernière catégorie (*concept car* dont la commercialisation est prévue en 2010 (après le *quick rinse* de la *GM* ?).

- **Les Hybrides parallèle** : C'est la solution la plus utilisée et le pionnier semble en être la *GM* avec le concept car *Opel Astra diesel Hy* qui serait commercialisé en 2011. Les mouvements des moteurs thermique et électrique sont additionnés mécaniquement (par exemple avec un train épicycloïdal). Dans la *Toyota Prius*, le modèle le plus connu de cette catégorie, le véhicule peut fonctionner soit en *parallèle* soit en *série* (circulation urbaine), le mode parallèle se remettant automatiquement en marche quand la réserve de la batterie devient insuffisante. Ce système est aussi celui des prototypes Hybride *HDI* de *PSA*, de la *Nissan Altima*, des *Honda Civic Hybrid et Insight*, des *Lexus Rx400h, GS450h, LS600h* et d'autres qui utilisent des variantes de ce principe.

Pour les deux dernières catégories, les *Hybrides série* et les *Hybrides parallèle*, on ajoute maintenant l'option de pouvoir les recharger sur le réseau électrique, ce qui permet, pour les petits trajets quotidiens, de les utiliser comme une voiture électrique : on les nomme **Plugin Hybrids**. En termes d'économies d'énergies fossiles, l'option *Plugin Hybrid* est surtout intéressante dans les pays où l'électricité est fournie par des centrales autres que thermiques. En termes d'écologie, elle a l'avantage de diminuer les pollutions en *NOx*, *CH*, *CO* et particules diverses dans les agglomérations. Ainsi, grâce à cette option, la *Chevrolet Volt* permettrait à ses utilisateurs de rouler un maximum de 60 km par jour sans utiliser d'essence, en rechargeant les batteries la nuit. Le moteur thermique est remis en route lorsque les batteries sont épuisées. L'option *Plugin* a été rajoutée sur les derniers modèles de la *Toyota Prius* ainsi que, entre autres, sur les nouveaux prototypes *Peugeot Hybrides*.

## IX ) Evaluation des avantages apportés par les *Hybrides* :

La question est : **la technique des *Hybrides* apporte-t-elle un réel avantage en termes d'économies d'énergie par rapport aux véhicules propulsés par les seuls moteurs thermiques les plus avancés ?**

**1. Les *Stop & Start*** ne sont pas des *hybrides* à proprement parler puis qu'il n'y a pas de stockage d'énergie en vue de sa restitution ultérieure. Cependant cette technologie *PSA*, applicable aussi bien aux véhicules diesel qu'à essence, permet des économies significatives en circulation urbaine. Appliquée sur les petites citadines de *Citroën* elles donnent des résultats remarquables à comparer avec ceux des meilleures *hybrides* bien que celles-ci appartiennent à la classe supérieure des berlines compactes :

Citroën	Consom. mixte	Consom. urbaine	Consom. ex-urbaine	Etiquetage CO <sup>2</sup>
C3 1,4 LHDI	4,2 L/100km	5,1 L/100km	4,2 L/100km	<b>B (&lt; 120g/km)*</b>

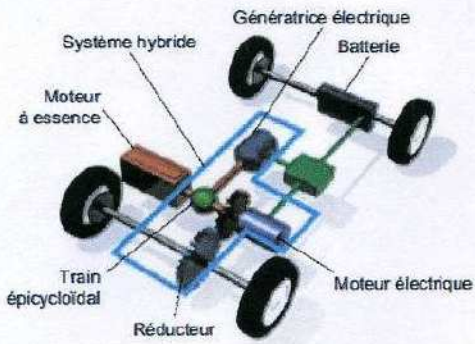
\* *Encore s'agit-il d'un véhicule diesel, désavantagé dans ce type de classification par rapport aux véhicules à essence à consommation comparable.*

**2. Les *Stop & Start à récupération d'énergie*** sont de véritables *hybrides* puisque l'énergie cinétique du véhicule est récupérée lors des ralentissements et freinages par le ou les moteurs électriques et est stockée dans des batteries. Applicables à tous les véhicules, *cette technologie* améliore le rendement à condition qu'elle ne soit pas dévoyée pour donner un supplément de puissance à l'accélération, ce qui semble être le cas de pas mal de projets aussi bien américains (exemple : le *Chevrolet Silverado* mu par un V8 de 5.3 litres développant une puissance de 295 CV ...) qu'européens ou japonais.

**3. Les *Hybrides parallèle*** : On les évaluera avant les *Hybrides Série* parce que le modèle le plus connu de cette technologie, la *Toyota Prius*, combine à la fois la technique *parallèle* et la technique *série*, cette

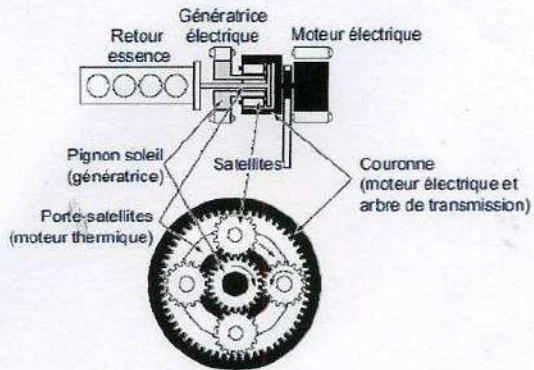
dernière étant utilisée en circulation urbaine par découplage du moteur thermique.

Fig. 1 Architecture générale de la Toyota Prius version 2003 (système THS 2)



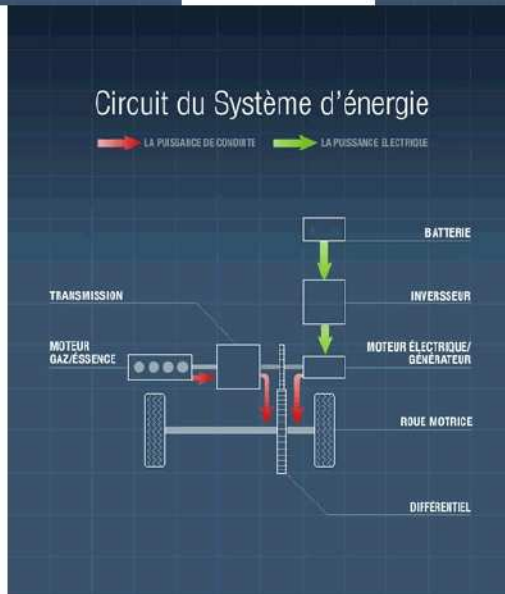
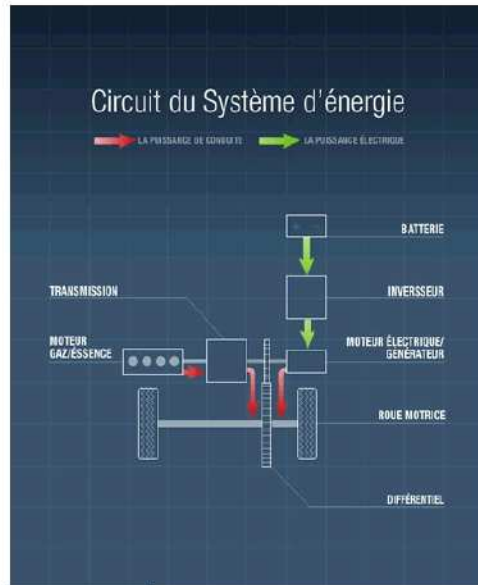
Source : Toyota

Fig. 2 Détail de la chaîne de traction du système THS 2 de la Prius

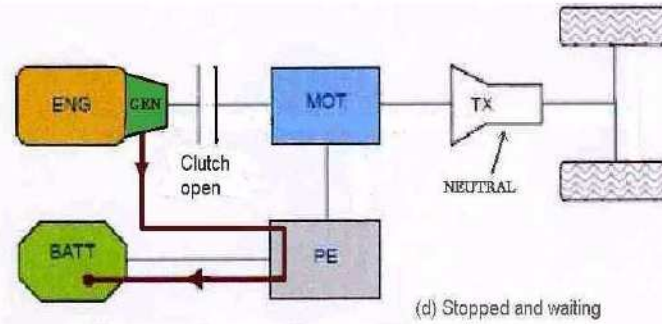


Source : Toyota

Schéma de fonctionnement <sup>19</sup>:



A quoi on peut ajouter pour les recharges à l'arrêt :



Il en résulte un véhicule qui a d'excellents résultats en termes de réduction de la consommation, notamment urbaine, mais **au prix d'une complexité qui se retrouve dans le coût**. Les derniers modèles de la *Prius* (Salon de Genève 2009) intègrent l'option *Plug-in Hybrid*, ce qui a permis de baisser encore la consommation. Les batteries de la *Prius* sont non pas des *lithium-ion*, comme dans les projets de véhicules électriques actuels, mais des *Ni-MH* (nickel/métal-hydrures) délivrant une tension nominale de 201,6 V grâce à 28 modules pour une capacité de 6,5 Ah (3heures) et un poids de 39 kg. La tension est montée ensuite à 500 V alternatif par des transistors à *porte* de chez Panasonic. Ce choix, rendu possible par des exigences différentes de celles des véhicules électriques, permet d'abaisser le coût des batteries et, pour de grandes séries, d'éviter l'écueil d'une rupture d'approvisionnement de l'élément de base des batteries au lithium faute de ressources mondiales suffisantes de ce métal.

**Comparatif de consommations (données constructeur) et de prix pour la même catégorie de berlines compactes hybrides ou diesel :**

Marque	Modèle	Consom. mixte	Consom. urbaine	Consom. ex urbaine	Prix en €
Toyota	Prius	4,3	5	4,2	29 000*
Toyota	Prius III	3,9	nc	nc	nc
Honda	Civic Hy	4,6	5,2	4,5	27 000
Honda	Insight 2 (Hy)	4,4	nc	nc	20 000
Citroën	1,6 HDI	4,7	5,9	4,3	20 000
Dacia	Logan diesel	4,7	nc	nc	11 000
Opel	Proto Astra diesel Hybride	#4,0	nc	nc	nc
Citroën	Proto Cactus Hy	2,9	nc	nc	nc

\* Toutes options (24 000 € sans options)

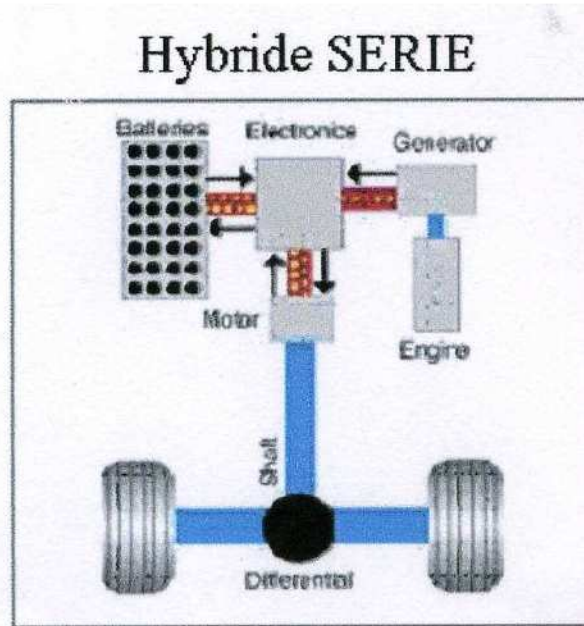
*La question est :* Un supplément de prix de 35 % (pour la *Prius*) par rapport à un *HDI* de la même catégorie et du même standing est-il justifié pour un gain de consommation de ½ L/100 km ?

Il faut rouler environ 1 300 000 km pour amortir ce supplément de prix ! Encore ne s'agit-il là que du prix d'achat alors que dans le prix de revient de la *Prius*, il faut ajouter à celui de la consommation, le remplacement de la batterie après environ 3 ans. La stratégie de *PSA*, a été jusqu'ici de faire confiance à la technique *HDI* (alors que *Renault* semble miser sur la voiture électrique ...) pour obtenir des résultats presque aussi bons mais à des prix plus accessibles. Néanmoins *PSA* étudie l'association des technologies *hybride* et *HDI* sur des *concept cars* tels que la *C Cactus*, la luxueuse *C Métisse*, etc.

Enfin rappelons que les chiffres ci-dessus sont des données *constructeur* alors que selon le journal *Automoto* (Octobre 2007), une *Prius* consomme plus sur autoroute qu'une *Mercedes diesel* classe *E*

**4. L'Hybride série** : Son architecture est simple comparée à celle des véhicules précédents.

- On considèrera d'abord les *hybrides* qui ne sont que des voitures électriques pourvues d'un petit groupe électrogène. En rechargeant plus ou moins les batteries, ce dernier permet d'allonger sensiblement le rayon d'action qui peut être ainsi porté de 160/200 à 400 km. Au démarrage, la batterie a été chargée sur le secteur (*Plug in*) et après un certain kilométrage, le groupe électrogène se met en marche



Source: *Electric Transit Vehicle Institute*

On notera la disparition des embrayage, couplage et boîte de vitesse tandis que le *Stop & Start* n'a plus sa raison d'être. En contrepartie, la taille de la batterie doit être importante avec tous les handicaps qui lui sont liés. Ce type de véhicule peut convenir pour une circulation urbaine et occasionnellement interurbaine. Plusieurs prototypes ont été conçus selon ce schéma dont *La Cleanova II est un exemple*. Ce véhicule *hybride* à dominante électrique a été présenté au Mondial de l'Automobile de Paris en 2004, par la *Société de Véhicules Electriques (SVE)*, entreprise formée par le groupe *Dassault* et *Heuliez*. Un exemplaire du véhicule, élaboré sur la base d'une *Renault Kangoo*, a été montré au kiosque *Heuliez*.



*La Cleanova II* est équipée d'un système de motorisation qui intègre dans une même enveloppe un moteur de traction de 35 kW avec différentiel intégré et un générateur de 15kW, prolongateur d'autonomie. Cette enveloppe loge également l'électronique de pilotage et de conversion de puissance, le convertisseur dévolteur CC-CC, le chargeur de batterie et le moteur à combustion choisi par la *SVE*.

- Avec des moteurs thermiques plus généreux et une batterie de beaucoup plus petite taille, la configuration et surtout le système de fonctionnement changent complètement et permettent d'envisager des véhicules tous usages dans la catégorie compacte ou même supérieure qui font le gros des ventes. Alors que dans le cas précédent on avait un hybride à dominante électrique, en ce sens que son fonctionnement reposait essentiellement sur une batterie de large capacité rechargée par un petit moteur thermique, on a dans cette seconde configuration un véhicule à transmission électrique dans lequel la batterie joue un rôle de stockage tampon de l'énergie pour un moteur thermique qui n'est pas sous-dimensionné. La taille de la batterie peut être légèrement accrue pour une recharge de nuit (fonction *Plug in*) qui permettra au départ un usage urbain dont on a vu que 58 % ne dépassaient pas 25 km.

Un *concept car* a été construit suivant ce principe : la *Chevrolet Volt* déjà citée<sup>17</sup>.

Il s'agit d'une berline *Plug in* déjà grande (4.40m) dotée d'un moteur thermique *EFlex* qui fonctionne par intermittence et d'un moteur électrique qui lui fonctionne en permanence quand la voiture est en mouvement.

**Caractéristiques de la Chevrolet Volt :**

*Moteur thermique :*

3 cylindres  
Cylindrée 1000 cc turbo-compressé  
Régime : unique à 1800 t/min  
Puissance : 53 kW (72 CV)  
Carburant Flexfuel (de E98 à E85)  
Réservoir : 45 litres

*Moteur électrique :*

Puissance : 136 kW (175 CV)  
Couple ; 370 nm

*Batterie :*

Type : Pack lithium ion, échangeable  
Poids : 180 kg  
Capacité : 16 kWh  
Temps de charge : 6 à ,5 heures  
Recharge sur secteur ; une prise sur chaque côté (110 V aux USA, 240 V pour les modèles destinés à l'Europe)  
Durée de vie : 160 000 km

*Structure :*

Berlines 2 portes, classe C  
Traction avant  
Longueur ; 4,4 m  
Poids total à vide : nc

*Performances :*

Vitesse maximum : 160km/h  
Accélération ; 0 à 100 km en 8,5 sec

*Autonomie :*

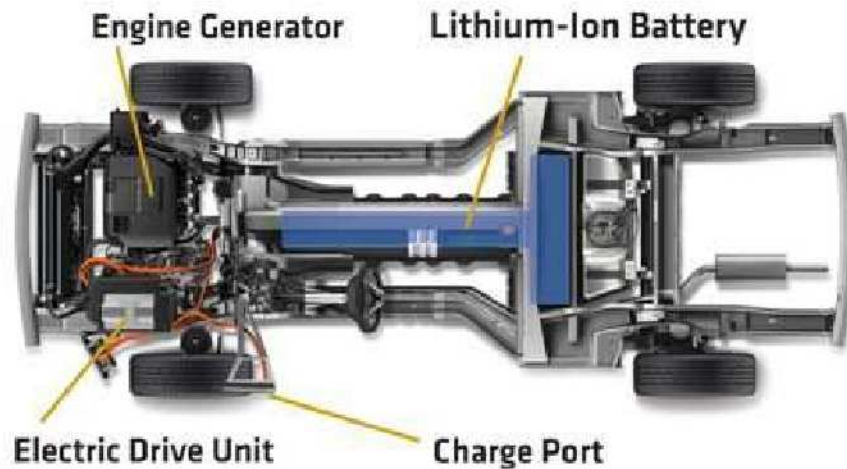
Sur batterie seule : 64 km  
Totale : 1000 km

*Consommation :*

Moyenne : 1,5 L/100 km  
Au départ avant démarrage recharge : 0 L/100 km  
En phase de recharge batterie : 4.7 L/100 km  
Emission CO<sup>2</sup> moyenne (calculée) : 34g/km

Les performances annoncées sont remarquables et même si le modèle mis en production a des caractéristiques un peu moins flatteuses, **ce véhicule apparaît comme une vraie percée technologique et préfigure un nouveau type d'automobile.**

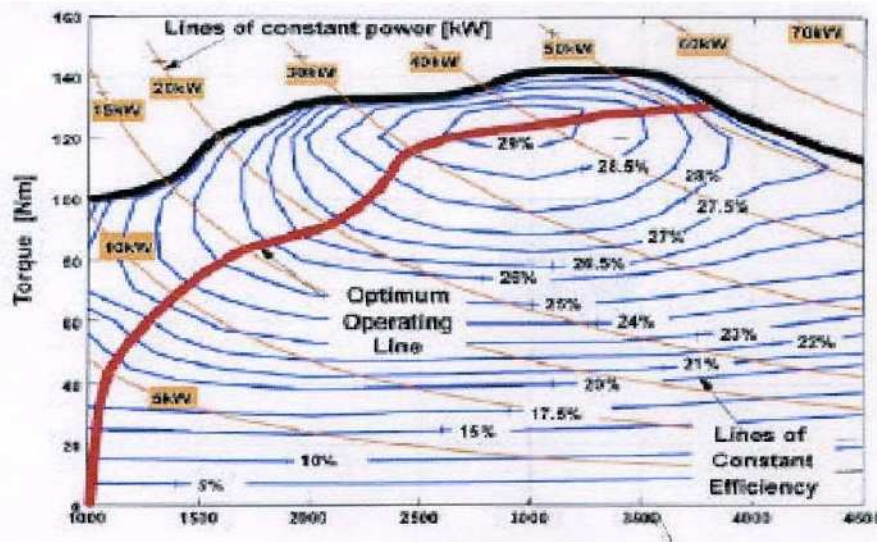
*Configuration :*



*Remarques :*

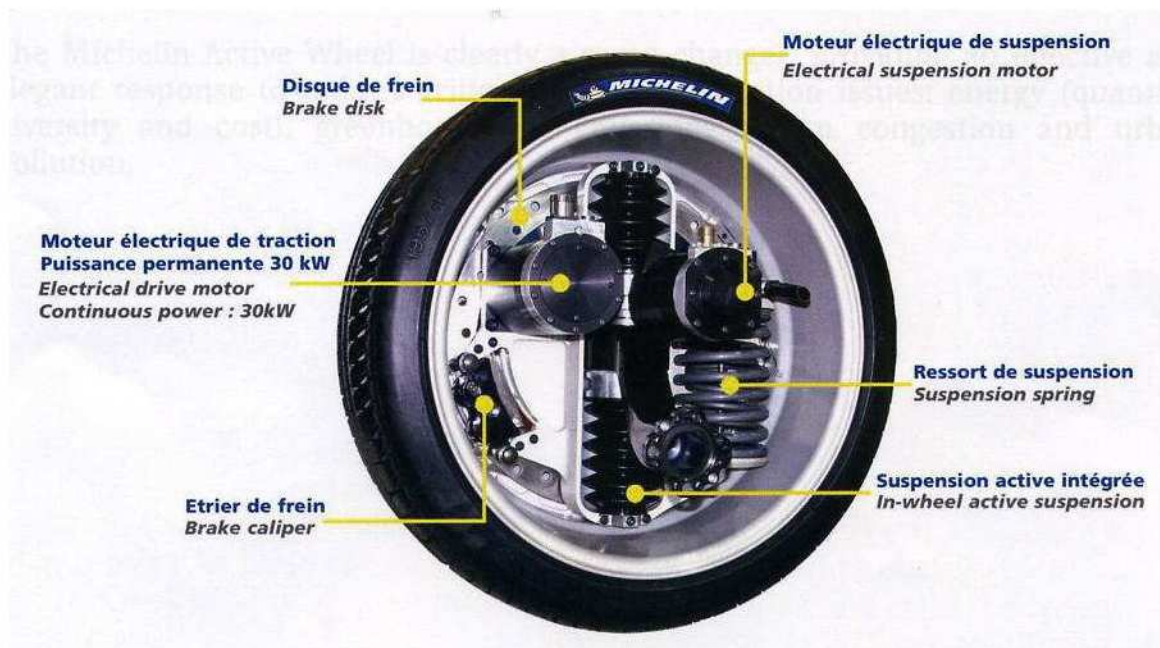
Les ingénieurs ont voulu mettre dans ce prototype toutes les solutions prisées par la mouvance écologique d'où le moteur *Eflex* qui peut avoir de l'intérêt au Brésil mais beaucoup moins ailleurs. Là n'est pas l'essentiel et il est évident qu'à la place de celui-ci on peut envisager de décliner tous les paradigmes des moteurs thermiques les plus avancés et de puissance équivalente, à essence ou diesel. D'autre part, les batteries sont des *Li-ion* dont on a vu qu'aucun constructeur ne se hasarde à les monter sur des véhicules produits en série, ne serait ce que pour des questions de sécurité. Avec des batteries *Ni-MH* (en attendant mieux) de poids sensiblement équivalent, l'autonomie électrique serait ramenée à environ 22 km, ce qui est encore suffisant pour la majorité de petits parcours urbains, tout au moins en Europe. Bien entendu, les paramètres de ce prototype peuvent être modulés en fonction des besoins de la clientèle (notamment en ce qui concerne la taille de la batterie) et des avancées technologiques à venir mais **le principe restera le même car il apparaît comme le meilleur de tout ce qui a été tenté jusqu'à présent** et ceci pour trois raisons essentielles :

- Après chargement sur le secteur, le fonctionnement sur batterie est ajusté à la longueur des petits parcours urbains
- Le rôle de la batterie comme tampon, réservoir et récupérateur d'énergie permet de lisser les appels d'énergie variables correspondant aux différentes vitesses, accélérations et ralentissements d'un parcours
- Le moteur thermique de ce fait tourne par intermittence à une vitesse unique toujours dans la plage de son rendement optimum ce qui d'ailleurs en diminue la complexité et le prix<sup>15</sup> :



## X) Une percée technologique complémentaire : la Roue Active Michelin (RAM):

Célébrée par la presse lors du salon de Shanghai de 2008, la RAM ne semble pas avoir beaucoup retenu l'attention du grand public lors du dernier *Mondial de l'Auto* d'octobre 2008 (Porte de Versailles) malgré le stand, assez peu fréquenté, que lui avait réservé *Michelin*. L'idée de mettre un moteur électrique dans la roue n'est pas nouvelle et d'autres en ont déjà proposé des prototypes ou l'ont fait pour de gros camions *dumper*. La prouesse des ingénieurs de *Michelin* (*Michelin Recherche Technique SM - Givisiez - Suisse*) est d'avoir réussi à loger dans cette roue de 30 kg non seulement un moteur de 30 kW mais aussi les freins et une suspension électrique à guidage électronique, ce qui réduit beaucoup la masse non suspendue.



Document Michelin

Le rendement énergétique des moteurs, refroidis à l'eau, est de 90 %, La suspension électrique intégrée au cœur de la *RAM* a un temps de réponse extrêmement rapide (3/1000ème de seconde) qui permet de contrôler électriquement tous les mouvements du châssis -roulis, tangage - et assure une stabilité et une tenue de route sans précédent à la voiture. De ce fait, celle-ci est considérablement allégée : elle n'a ni boîte de vitesse, ni pont, ni arbre de transmission, ni différentiel, ni cardans, ni amortisseurs et le moteur électrique attaque la roue directement par une couronne dentée interne.

A ce dernier Salon de la Porte de Versailles, *Heuliez* a présenté sur son stand une petite berline électrique de 5 places, *la WILL*, développée à partir d'un châssis *Opel Agila* modifié, équipée de batteries *lithium-ion* et à l'avant de deux *RAM* qui lui assurent une puissance de 60 kW pour une autonomie de 150 km avant nouvelle recharge. *Heuliez* - qui est en redressement judiciaire - prévoit, à partir de 2010, d'autres racks de batteries qui pourraient porter l'autonomie à plus de 300 km.



Les deux roues arrière sont normales et l'usage prévu est exclusivement urbain.

Un autre prototype de *VE*, la *Venturi Volage* qui est un coupé sport, a été présenté avec 4 *RAM*, ce qui lui confère une puissance de 120 kW.

A la place de *VE*, dont on a vu que les perspectives de développement sur le marché étaient handicapées par un usage spécifique restreint ainsi que par le prix et la sécurité trop aléatoire des batteries *Li-ion*, on aurait aimé voir un prototype *Hybride Série* équipé de ces mêmes *RAM* (*Michelin Active Wheels - MAW* - en anglais).

Imaginons ce que pourrait être un tel véhicule de caractéristiques semblables à la *VOLT* mais avec des batteries *Ni-MH* et équipé de 4 *RAM* :

Moteur thermique essence ou diesel 50/60kW, régime unique 1800/3000 t/mn

Réservoir de carburant 40/50 L

4 *RAM* délivrant 120 kW

Batterie *Ni-MH* 5/6 kWh, 80/100 kg, fonction *Plug in*

Longueur 4,3/4,4 m

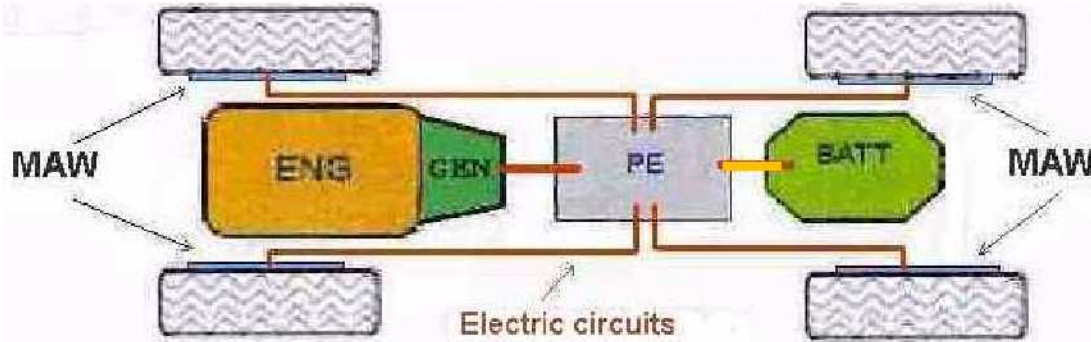
Autonomie en ville 22/25km

Autonomie totale 700/1000 km

Vitesse maximale 150/160km/h

La consommation moyenne ne devrait pas dépasser 2L/100 Km et serait, compte tenu de l'allègement de poids, de l'ordre de 4 L sur autoroute.

Voici schématiquement à quoi pourrait ressembler l'architecture d'un tel véhicule :



Configuration d'un Véhicule Hybride Série équipé de Roues Actives Michelin

On a marié ici les caractéristiques cohérentes des prototypes existants : un véhicule *Hybride Série* et la *RAM* de 30 kW telle qu'elle a été présentée. On peut envisager qu'on pourra faire varier ces caractéristiques dans le futur afin de décliner toutes sortes de modèles susceptibles de satisfaire les aspirations d'une clientèle diversifiée :

- La puissance du véhicule par le nombre de RAM et ultérieurement par celle des moteurs (thermiques et électriques)
- La capacité des batteries en fonction de la destination du véhicule : usage à dominante urbaine ou à dominante route, la fonction *Plug in* pouvant être éliminée dans ce dernier cas

**Il est étonnant que l'application de la remarquable rupture technologique que représente la RAM, n'ait jusqu'à présent été envisagée que pour des véhicules purement électriques ou des prototypes mus par une pile à combustible** dont on a vu que la mise sur le marché est encore aléatoire et lointaine. Le mariage des concepts de la *VOLT* et de la *RAM* devrait apporter à brève échéance une solution élégante aux aspirations de la clientèle pour une voiture tous usages et tels que ceux-ci sont pratiqués, avec une consommation qui serait nettement inférieure à toutes les meilleures réalisations actuelles.

## XI ) Conclusion :

**La raréfaction programmée des énergies fossiles et en premier lieu des hydrocarbures liquides, entrainera inéluctablement une ascension de leur prix.** Elle incitera tant les décideurs publics que tous les constructeurs à rechercher une baisse aussi importante que possible de la demande d'énergie dont les transports routiers et en particulier les automobiles représentent un pourcentage important. Cependant **du fait de leur densité énergétique incomparablement plus élevée que toutes les autres formes d'énergie, les hydrocarbures paraissent incontournables pour encore de nombreuses décennies**, quitte à les fabriquer à partir d'autres énergies fossiles moins aisément accessibles ou de la biomasse quand toutes les autres ressources seront épuisées. De nombreux champs de recherche ont été explorés pour contourner cette évidence mais n'ont abouti jusqu'ici qu'à des solutions qui n'ont qu'un intérêt limité tant par leur possibilités d'utilisation que par leur coût. De nombreux experts de l'énergie et des transports sont unanimement arrivés à la conclusion que les voitures, quant elles sont tout électriques, à hydrogène - avec ou sans pile à combustible - ou à air comprimé, même si elles sont moins polluantes, n'ont pas d'avenir : les premières parce qu'elles sont tributaires des batteries actuelles qui n'apportent aucun gain énergétique et ne permettent guère qu'un usage urbain - les plus performantes étant chères, peu sûres, et bornées dans leur développement ; les secondes parce que l'hydrogène à bord d'un véhicule, peu sûr lui aussi, coûte dix fois plus cher que les gaz à partir desquels il est fabriqué et fait apparaître un bilan énergétique désastreux ; enfin les troisièmes

parce qu'elles relèvent d'une aberration thermodynamique ...

La consommation des véhicules en hydrocarbures peut se mesurer soit en litres de carburant aux 100 km soit en émission de grammes de CO<sup>2</sup> au km. Les deux mesures sont étroitement liées quand on utilise des hydrocarbures d'origine fossile. On a pensé que cette règle ne s'appliquait plus si on utilisait des biocarburants, le CO<sup>2</sup> envoyé dans l'atmosphère étant alors recyclé par les plantes utilisées. C'est ainsi que de nombreux pays se sont engagés dans la production d'éthanol à partir de denrées vivrières. Après calcul du bilan global, il est apparu que, sauf au Brésil, il restait autant de CO<sup>2</sup> non recyclé que lors de l'utilisation directe des hydrocarbures fossiles. De plus l'utilisation de denrées vivrières pour produire du bioéthanol a provoqué une envolée des prix de ces denrées à l'échelle mondiale et conduit à une impasse en termes de disponibilité des terres cultivables. A part le cas particulier du Brésil qui a la possibilité d'utiliser la canne à sucre, les pays à climat tempéré vont vers l'abandon de cette voie en attendant que soit mis au point une exploitation rentable de la biomasse.

Dans l'état actuel des techniques disponibles, il reste deux voies qui montrent un réel intérêt :

- L'alimentation des moteurs thermiques par du gaz soit de pétrole soit issu de la biomasse, liquéfié ou bien comprimé, avec comme avantage des rejets peu polluants et comme inconvénient un bilan énergétique médiocre lié à la compression de ce gaz dans des bouteilles qui alourdissent les véhicules et qui posent des problèmes de sécurité. Finalement la voie *GTL* (Gas to Liquid) pourrait s'avérer préférable.
- Les véhicules *hybrides* : Plusieurs techniques ont été développées ou sont en cours de développement : Les véhicules *Hybrides Parallèle* et les véhicules *Hybrides Série*. Les premiers, dont le plus connu est la *Toyota Prius*, montrent un gain de consommation appréciable, légèrement supérieur à celui des meilleurs diesels mais au prix d'une grande complexité qui se traduit par des surcoûts importants. Finalement, la technologie la plus prometteuse est celle des *Hybrides Série* qui permet le mieux de **baiss**er les **consommations élevées de la circulation urbaine, une des causes majeures de la pollution dans les villes et à l'origine d'un énorme gaspillage d'énergie. Le prototype Volt de Chevrolet, doté de la fonction Plug in constitue à cet égard une remarquable réussite. Le mariage de cette technologie avec celle de la Roue Active Michelin, dont l'importance n'a pas été suffisamment soulignée, devrait préfigurer ce que sera la voiture de demain**, une voiture tous usages correspondant aux aspirations de la majorité des automobilistes et permettant d'atteindre l'objectif d'une consommation qui se situerait entre 1,5 et 4 L/100 km.

Parallèlement, les perfectionnements des moteurs thermiques (injection directe multipoints, *downsizing*) devraient contribuer à améliorer encore les performances de la voiture *Hybride Série à roue active*. Enfin, **il appartient aux pouvoirs publics de faire évoluer les mentalités** pour que la majorité des conducteurs prennent conscience qu'il n'est pas nécessaire d'avoir des monstres de plusieurs centaines de chevaux pour rouler à 130 km/heure ou amener les enfants à l'école. Des mesures comme le *Bonus Malus* ainsi que l'inéluctable montée du prix des carburants dans le moyen et le long terme, y contribueront certainement.

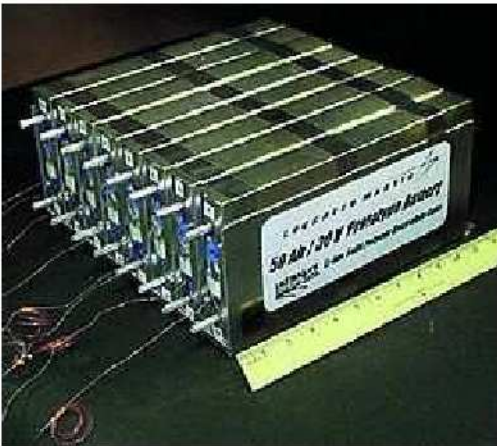
## Références :

- 1 P-R Bauquis *Pétrole et nucléaire* -TOTAL novembre 2008
- 2 J-M. Jancovici *Energie et changement climatique* SPIE PARIS, January 19/PRNewswire/
- 3 C. Gérondeau *CO<sup>2</sup> Un mythe planétaire* Toucan 2009
- 4 A Douaud *L'automobile face à l'effet de serre, la sortie du tout pétrole* CCFA/CNISF janvier 2006
- 5 *Les transports urbains en France* : Science & décision <http://www.science-decision.fr/cgi-bin/topic.php?chapter=7&topic=TRA>
- 6 *Les voitures classées par consommation et pollution* //www.ideesmaison.com
- 7 *Biocarburant : le bénéfice à l'usage est nul ... sa crédibilité mise en cause par un audit mené à la demande de l'ADEME et de l'IFP ...* [www.univers-nature.com/](http://www.univers-nature.com/) 6 mai 2008
- 8 R. Giraudon *Les mérites de l'éthanol* Note inédite au CNISF février 2008
- 9 *L'huile de palme un cauchemar écologique* Science Presse avril 2007
- 10 J. Syrota *Perspectives concernant Le VÉHICULE « grand public » d'ici 2030* - 28 sept 2008 [www.strategie.gouv.fr](http://www.strategie.gouv.fr)
- 11 *Transports et énergie - Rapport CNISF - Annexe 8* juillet 2006
- 12 J-M Gires *Les défis énergétique et climatique* Total 2009
- 13 *Palmarès 2009 des voitures les moins polluantes* <http://www.vedura.fr/actualite/5301->
- 14 *L'automobile hybride* [http://fr.wikipedia.org/wiki/Automobile\\_hybride](http://fr.wikipedia.org/wiki/Automobile_hybride)
- 15 G. Plassat *Les véhicules hybrides* [www.consciencenergetique.com/files/ademe](http://www.consciencenergetique.com/files/ademe)
- 16 *Automobiles hybride* [http://fr.wikipedia.org/wiki/Automobile\\_hybride](http://fr.wikipedia.org/wiki/Automobile_hybride)
- 17 Sam Abuelsamid *Detroit Auto Show: Chevy Volt Concept* <http://autobloggreen.com/>
- 18 *Rouler au GNV* [http://www.roulezgnv.com/le\\_gnv](http://www.roulezgnv.com/le_gnv)
- 19 *Véhicules hybrides quel avenir ?* [www.ifp.fr/content/download/56071/1242324/](http://www.ifp.fr/content/download/56071/1242324/)
- 20 R. Apter, C. Finidori, M. Präthaler *Impact des véhicules hybrides sur l'environnement* [www.ccat.ch/ccat\\_picture/impact\\_environnement.pdf](http://www.ccat.ch/ccat_picture/impact_environnement.pdf)

## Annexe 1

## Évolution des batteries :

Les batteries nécessaires aux voitures électriques mais également aux voitures [hybrides](#) ont suivi une évolution technologique continue et les progrès sont importants, malheureusement actuellement, aucune solution n'est encore entièrement satisfaisante.



Alors que les batteries au plomb ont une capacité de 30 Wh par kg, d'autres types se sont développés<sup>2</sup> :

nickel - cadmium (Ni - Cd) 50 Wh par kg (*abandonnées à cause de la toxicité du Cd*)

nickel - zinc (Ni - Zn) 80 Wh par kg

Ni - MH 75 Wh par kg

plomb 2<sup>e</sup> génération (2006) 75 Wh par kg [\[1\]](#)

système zébra : sodium - chlorure de nickel 85 Wh par kg

•<sup>re</sup> filière lithium - ion de 1992 (Li - Ion) 90 Wh par kg

sodium - soufre (Na - S) 107 Wh par kg

Lithium Métal Polymère de 2004 (LMP) 110 Wh par kg

lithium polymère (Li - Po) 120 Wh par kg

lithium - ion 2<sup>e</sup> génération (2000) 150 Wh par kg

zinc - argent (2007) 200 Wh par kg [\[2\]](#)

manganèse - lithium - ion ; également dénommées lithium - manganèse (2007) 300 Wh par kg [\[3\]](#)

lithium - soufre de 2007 (Li - S) 300 Wh par kg

lithium - vanadium + de 300 Wh par kg (mais combien exactement ?) présentée par Subaru en 2007 :

Seules les batteries de la filière Ni-MH sont actuellement suffisamment fiables pour être commercialisées dans les voitures

Et pour bientôt :

[Supercondensateur](#) à la poudre de céramique - aluminium (EESstor aux États-Unis) ([3](#) et [4](#)) : Elles devraient être utilisées dans un premier temps pour les **voitures électriques**, puis plus tard pour le stockage d'énergie appliqué à l'éolien et au solaire.

Condensateurs - lithium - ion (FHI) : en essai au Japon. et a Opio !!!!

Source Wikipedia

## Annexe 2

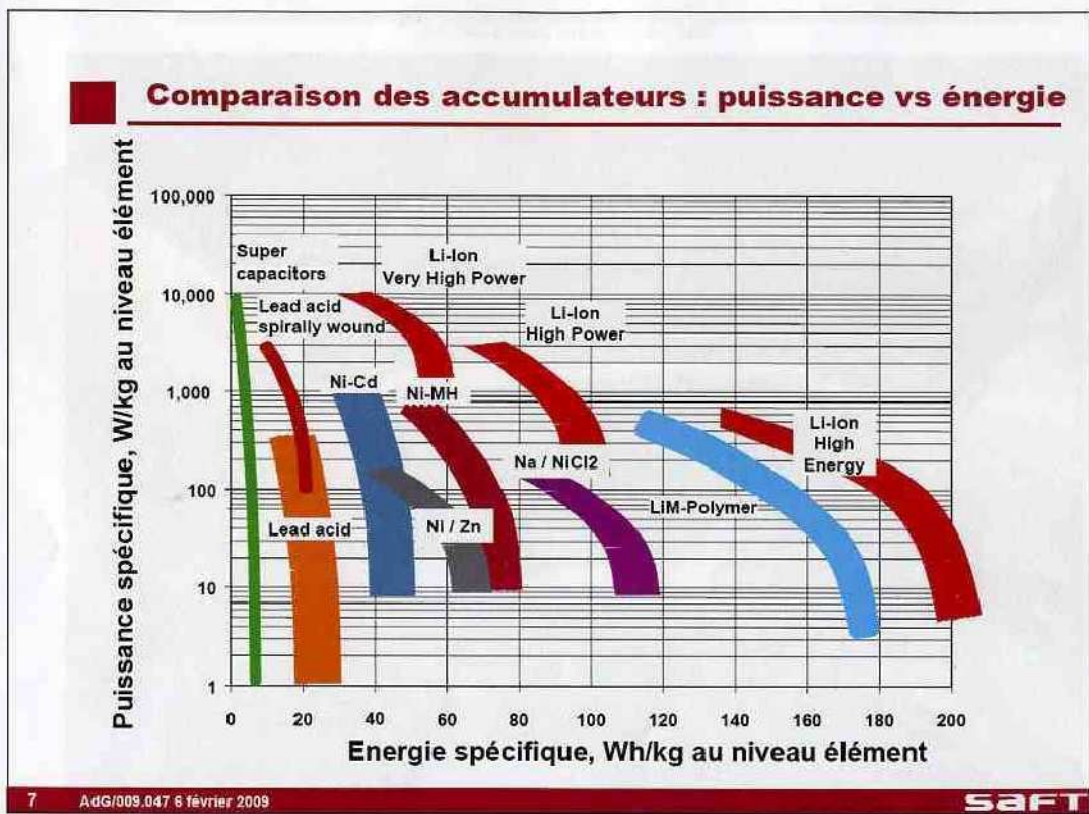


## Les batteries pour véhicules électriques

- Performances : Energie spécifique (Wh/kg) , Puissance spécifique (W/kg) ,Autodécharge, Rendement de cycle ,...et Recyclage (ACV)
- Fonctionnalité : Cyclabilité, Température de fonctionnement, Entretien, Sécurité, Coûts,...
- Plomb , Nickel-Cadmium, Nickel-Métal-Hydrure, Lithium-Ion, Lithium-Polymère, Lithium-Métal-Polymère,... Nickel-Zinc
- Sodium-Chlorure de Nickel (Zébra) , Sodium-Soufre

**INRETS**  
Institut national de recherche sur les transports et leur sécurité

Conférence CNISF - CCFA- 23 avril 2009



**Annexe 3****Tokyo Live 2007 : Suzuki Kizashi 2**

« Après avoir étonné le monde automobile avec le prototype Kizashi au Salon de l'auto 2007 de Francfort, Suzuki récidive, cette fois avec le prototype Kizashi 2, un multisegment sport dont les lignes athlétiques inspirent un dynamisme qui fera tourner les têtes à coup sûr.

Destiné à des consommateurs actifs, tant en affaires que dans leurs loisirs, le prototype Kizashi 2 est doté d'une allure séduisante démontrant à la fois son statut et son énergie, et laisse deviner ses performances et le plaisir de conduire.

**Sous le capot, son moteur V6 de 3,6 litres est le plus puissant jamais utilisé par Suzuki.** Il est couplé à une boîte de vitesses automatique à six rapports, permettant des accélérations racées et des performances étincelantes à vitesse de croisière. En vue d'offrir une option plus « verte » de ce modèle, Suzuki étudie aussi la possibilité d'une technologie hybride » (... !)