



Article : 066

Les sources d'énergie pour l'automobile du futur : quelles options innovantes l'emporteront ?

CHANARON Jean-Jacques

nov.-15

Niveau de lecture : Peu difficile

Rubrique : Usages de l'énergie

L'industrie automobile cherche des innovations de rupture qui pourraient contribuer à sa survie, et, le cas échéant, lui procurer des avantages concurrentiels durables [article 065]. Mais l'innovation est un processus complexe. Elle a été identifiée comme un facteur critique pour le développement des entreprises mais elle demeure très difficile à gérer lorsqu'elle émerge ou doit être intégrée au sein d'organisations établies de longue date¹. La compréhension des directions qu'elle est susceptible de prendre implique le recours à un modèle d'analyse.

1. Un modèle d'analyse

De nombreux facteurs ou combinaisons de facteurs ont été avancés par les chercheurs en économie et en gestion pour expliquer les variables pouvant présider au succès ou à l'échec des innovations techniques et organisationnelles² : la configuration organisationnelle, et notamment la taille de l'organisation, le contexte culturel, la stratégie et le leadership, la créativité des ressources humaines. Il reste néanmoins que la compréhension des pratiques idéales pour innover reste très imparfaite³ et que l'innovation est une activité fragile et vulnérable⁴. Selon Dougherty et Hardy, les grandes organisations semblent s'avérer incapables d'innover de manière durable sur le long terme.

Mais la principale faiblesse de la littérature universitaire demeure son incapacité à fournir aux décideurs un modèle opérationnel de gestion de l'innovation. En général, les modèles qui ont été publiés privilégient une vision de l'offre par les institutions de recherche et les entreprises et négligent la vision par la demande, et notamment les attentes des utilisateurs et/ou consommateurs et leur niveau d'acceptation des nouveautés techniques qui leur sont proposées.

¹ Schumpeter, J.A., (1911), *The Theory of Economic Development: An Inquiry Into Profits, Capital, Credit, Interest, and the Business Cycle*, Harvard University Press, Cambridge, 1934 edition. Chanaron, J.J., Metcalfe, S.M., (2007), Schumpeter's Innovation Theory, in Carayannis, E., Ziemnowicz C., (2007). *Re-Discovering Schumpeter: Creative Destruction Evolving into 'Mode 3'*, MacMillan-Palgrave, New York, pp. 52-67.

² Des centaines de chercheurs ont publié des revues de littérature sur l'économie et le management de l'innovation dans les vingt dernières années, et notamment Tidd, Bessant and Pavitt (1997); Chanaron (1998); Burgelman, Christensen and Wheelwright (2004); Carayannis & Ziemnowicz (2007).

³ Ahmed P. K., (1998), Benchmarking innovation best practice, *Benchmarking for Quality Management & Technology*, 5, 1; pp. 45-56.

⁴ Dougherty D., Hardy C. (1996). Sustained product innovation in large mature organizations: Overcoming innovation-to-organization problems, *Academy of Management Journal*, 39, 5, pp. 1120-1153.

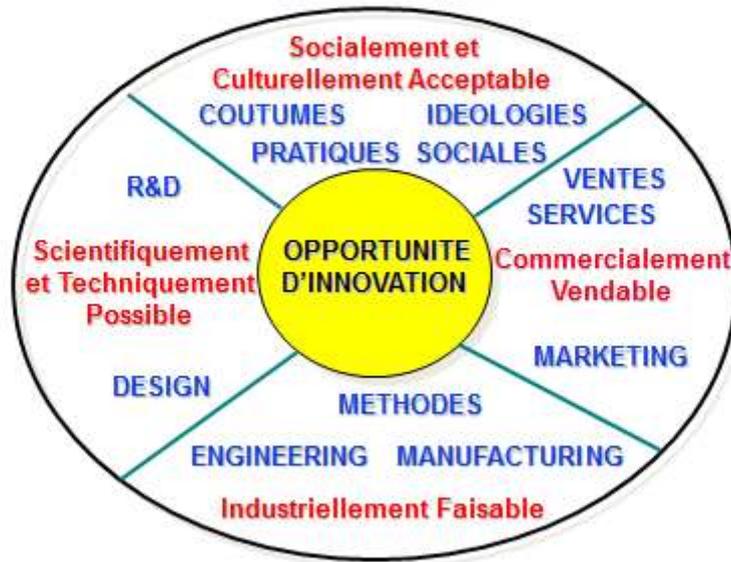


Fig. 1 : Un modèle systémique

Une nouvelle grille d'analyse permet d'évaluer quelles pourraient être les chances d'émergence de nouveaux produits, nouveaux services, nouveaux processus ou nouvelles organisations (figure 1)⁵. Elle suppose que doivent être simultanément (même moment, voire même lieu) satisfaites quatre conditions. Toute innovation potentielle doit être :

- « Scientifiquement et techniquement possible », c'est-à-dire rencontre les performances techniques attendues des consommateurs et des utilisateurs ;
- « Industriellement faisable », c'est-à-dire produite à des coûts et des niveaux de qualité satisfaisant toutes les parties prenantes ;
- « Commercialement vendable », c'est-à-dire lancée à un niveau de prix de vente et de coûts d'entretien et de maintenance marché qui soient acceptables par le marché ;
- « Politiquement, socialement et culturellement acceptable », c'est-à-dire reçoive les soutiens politiques et la pleine acceptation des consommateurs.

La grille prône que le succès d'une innovation donnée ne soit possible seulement quand et si les principales variables associées à ces quatre systèmes sont favorables et que l'échec intervienne quand des conditions clés de l'un ou de plusieurs systèmes ne sont pas remplies.

Ce qui suit est basé sur une méthodologie de recherche qualitative. Informations, données et opinions ont été recueillies par une revue de la littérature théorique et de la littérature scientifique et technique spécialisée : informations venant des intervenants traditionnels de l'automobile (constructeurs, équipementiers, laboratoires universitaires, fabricants de composants) ainsi que des nouveaux acteurs potentiels (fournisseurs d'énergie, fabricants de batteries et piles à combustible, producteurs d'hydrogène et distributeurs). Cette revue de la littérature a permis de mettre en place un guide d'entretien qui, après avoir été testé avec un nombre limité de personnes interrogées, a ensuite été conduit auprès de dirigeants des constructeurs et équipementiers automobiles en charge de la recherche-développement et/ou de la planification et avec des chercheurs des principaux laboratoires publics menant des projets automobiles novateurs en charge de composants de pointe tels que les batteries, les unités de commande électronique et les piles à combustible. Ont été

⁵ Chanaron J.J., (2013), Innovation Valuation: Guesswork or Formalized Framework? A Literature Review, in AKHILESH, K.B., (2013), *Emerging Dimensions of Technology Management*, Springer India, pp. 17-33. Chanaron J.J., (2014), Towards an Operational Framework in Forecasting Breakthrough Innovation: The Case of the Clean Automobile, *International Journal of Electric and Hybrid Vehicle*, Vol. 6, N°2, pp. 1-24.

également interrogés des responsables des sociétés d'approvisionnement en énergie (électricité, biocarburants, hydrogène). Toutes les personnes interrogées détenaient des positions de prise de décision dans leur fonction respective : R&D, stratégie, développement de nouveaux produits, planification de la production. Plus de soixante-dix entretiens ont été menés en Chine, en France, au Japon, en Allemagne, en Italie et aux Etats-Unis à l'occasion de plusieurs missions entre 2010 et 2014.

N'ont été retenus que les facteurs techniques, économiques, sociaux, culturels et politiques qui influent sur les caractéristiques de l'innovation technologique dans le groupe motopropulseur pour automobile. De toute évidence, un exercice scientifiquement plus robuste devrait tenir compte des tendances de la technologie pour d'autres équipements à bord ; des changements de comportements de consommation, tels que les choix de mobilité ; de nouvelles formes d'organisation des transports (personnes et marchandises) ainsi que l'évolution des règlements administratifs et de la gouvernance.

2. Des options en compétition

Appliqué aux différentes options technologiques [article 065], le modèle d'innovation fournit des éléments clés pour l'évaluation de la technologie et de la construction de scénarios.

Il existe un consensus parmi les personnes interrogées au sujet d'un scénario général dans lequel les différents paradigmes apparaîtraient successivement dans le temps, c'est-à-dire dès lors que chacun s'avère possible, réalisable, acceptable et vendable (figure 2).

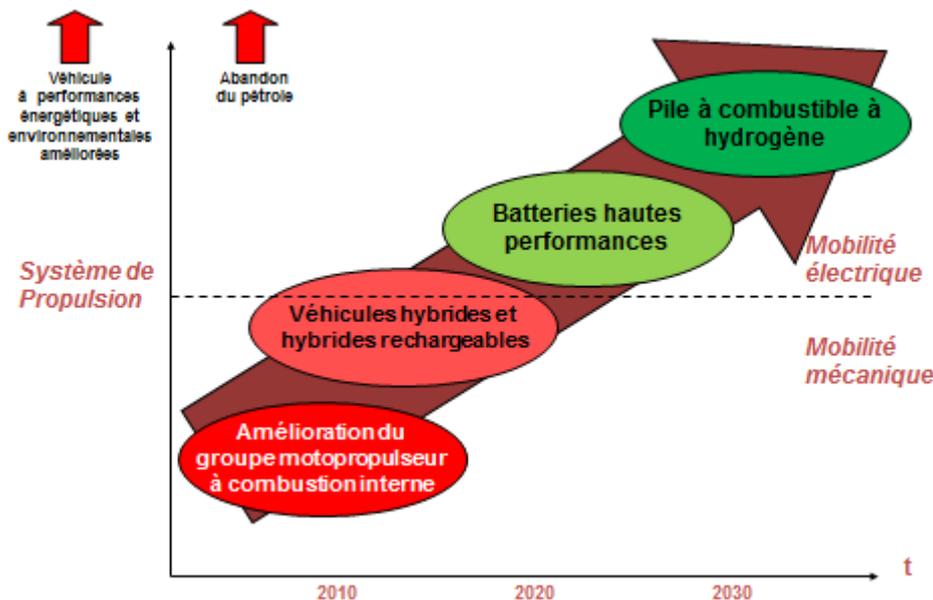


Fig. 2 : Un scénario de consensus

Les conditions préalables quant aux performances minimales des véhicules (habitabilité et vitesse), sécurité et fiabilité étant pleinement satisfaites, les six principaux facteurs clés de succès issus de la revue de la littérature et les entretiens sont les suivants :

1. Autonomie ;
2. Simplicité technologique ;
3. Coût total, c'est à dire l'achat et le coût d'utilisation ;
4. Disponibilité et sécurité d'approvisionnement, dans le temps et l'espace, de l'énergie primaire ;
5. Sécurité et fiabilité ;
6. Echelle de temps du déploiement des innovations.

Pour l'automobile, le stockage de l'énergie primaire à bord du véhicule est l'un des facteurs essentiels de prise de décision des clients-utilisateurs car il détermine cinq variables fondamentales : l'autonomie, la durée de réapprovisionnement, la sécurité, le poids et la taille du véhicule et le coût total (tableau 1).

L'autonomie ou la distance parcourue entre deux réapprovisionnements est évidemment un point clé. Il n'existe aucun consensus sur un niveau minimum acceptable pour un véhicule conventionnel utilisé en espace urbain ainsi que pour des relations interurbaines. Si le véhicule de l'avenir est une petite voiture de ville, une autonomie relativement limitée pourrait être possible. On sait qu'en France, par exemple, en 2008, 65 % des déplacements sont réalisés en voiture, tant comme passagers que conducteurs, pour 83 % des distances parcourues avec un taux d'occupation de 1,4 personne par voiture. 73 % des « navetteurs » utilisent une voiture ou une motocyclette⁶. 99 % des déplacements et 60 % des distances relèvent de la mobilité « locale », c'est-à-dire dans un rayon de 80 km autour du domicile. On compte 3,15 déplacements quotidiens pour une distance totale de 25,2 km et 8 km par déplacement. En Europe, 13 % seulement des déplacements font plus de 60 km et près de 40-50 % des voitures ne font jamais de déplacement supérieur à 150 km. Il y a évidemment d'importants écarts entre zones urbanisées et grandes agglomérations et zones rurales où la voiture est quasi-omniprésente faute d'offre alternative.

Tableau 1. Comparer le stockage d'énergie

	Unit	Essence	Diesel	Electricité	Gaz Naturel	Gaz Liquéfié	H ² compressée	H ² liquide
Etat		Liquide	Liquide	Chimique	Gaz	Liquide	Gaz	Liquide
Température	Centigrade	Ambiante	Ambiante	Ambiante-300°	Ambiante	Ambiante	Ambiante	-253°
Pression	Bars	1	1	1	>200	5-25	350-700	5
Energie massique	Wh/kg	11900	11800	30-200	2200	7080	1200	500-1000
Energie volumique	Wh/l	8900	9900	70-300	2500	4300	450	1800
Temps de recharge	Minutes	5	5	30-360	5	5	5	5
Efficacité réservoir à roue	%	30-35	40-42	80-85	20-38	30-35	~50	~30-35
Poids pour 60 litres	Kg	45	50	90-150	70	36	90-100	100-200
Autonomie	Km	~900	~1000	30-120	160	430	200-300	~180

Sources : Syrota, 2008 et coupures de presse..

⁶ Dernière grande enquête transports INSEE disponibles.

La majorité des déplacements sont à vocation locale qui dépendent de critères d'interaction spatiale très liés à l'organisation de l'espace et à la localisation des lieux d'emplois, des commerces et des équipements par rapport au lieu de résidence. C'est dire que la voiture électrique à autonomie réduite, inférieure à 100-150 km par charge, pourrait, en théorie satisfaire la quasi-totalité des besoins quotidiens des consommateurs. Evidemment, il resterait à résoudre le besoin de déplacements de longue distance interurbaine qui concerne un faible pourcentage de la clientèle. Une solution souvent avancée est la multi-motorisation : une petite voiture urbaine et une « grande » voiture familiale par ménage. Mais, pour le moment, la préférence de la clientèle est pour un véhicule « universel » plutôt que pour plusieurs véhicules spécialisés par ménage. L'une des caractéristiques clés du marché de l'automobile est que tout produit alternatif sera inévitablement étalonné aux performances du design dominant actuel.

L'échelle de temps est une autre dimension cruciale. Les clients ne sont jamais prêts à passer d'une technologie à l'autre en quelques années. Il y a environ 1,2 milliard de véhicules en circulation en 2014, dont 72% sont des voitures de tourisme. En 2013, les nouvelles immatriculations annuelles, qui renouvellent le parc, sont de l'ordre de 81 millions de véhicules dont 60 millions de voitures particulières et les analystes prévoient 85 millions en 2015 et 105 millions en 2020 dont 78 millions de voitures.

Selon les experts de l'industrie, le renouvellement du parc devrait prendre au moins 15 ans⁷. Mais ces estimations sont faites à technologie inchangée. Une nouvelle technologie devrait suivre le cycle traditionnel pour tout nouveau produit, à savoir une courbe en S avec un décollage relativement lente vers des volumes importants, ce qui prendra probablement plusieurs décennies.

Le coût total sera inévitablement un critère décisif. Le coût de l'énergie arrive au premier rang. Si le prix du pétrole dépasse durablement les 200 \$ US par baril puis continue à croître, comme le prédisent de nombreux experts, il devient une variable incitative forte à la recherche puis à la diffusion massive d'une chaîne de traction alternative. Mais en l'état actuel de la technologie et compte tenu du prix de l'essence en 2014, sous pression à la stabilité, voire à la baisse avec l'émergence des gaz de schistes, toutes les solutions alternatives s'avèreront plus coûteuses. Les solutions hybrides rechargeables ou tout électrique à batteries devront faire face à un coût de recharge qui pourrait augmenter avec le développement d'une infrastructure dédiée de bornes et stations de recharge et le déploiement des réseaux d'électricité nationaux qui devront être mis à niveau de façon spectaculaire pour soutenir les systèmes de recharge rapide et simultanée de millions de véhicules. Quant au coût de remplacement des batteries en fin de vie, il pourrait également s'avérer élevé.

En 2008, Williams, estimait que le HEV rechargeable pourrait être une solution viable si l'essence était au prix de plus de 6 \$US par gallon aux Etats-Unis⁸. A son plus haut en 2008, il était de 4 \$US et il est d'un peu plus de 3 \$ US en 2014. De nombreux auteurs se sont récemment penchés sur les différents avantages comparés des véhicules à batterie et des véhicules conventionnels en matière de consommation, de pollution, de cycle de vie, de coût total sans qu'il soit possible de déterminer un perdant ou un gagnant tant sont nombreuses, complexes et variables les hypothèses à mettre en œuvre⁹.

La simplicité technologique constitue un facteur plus difficile car il est fortement liée à des déterminants socio-psychologiques. Selon les enquêtes réalisées en Europe et aux Etats-Unis, les

⁷ Heywood J., & al., (2008), *On the Road in 2035*, MIT, July. Syrota J., (2008), *Perspectives concernant le véhicule "grand public" d'ici 2030*, Centre d'Analyse Stratégique, Le Point, Paris, 28 septembre.

⁸ Williams E., (2008), *Plug-in and Regular Hybrids: A National and Regional Comparison of Costs and CO2 Emissions*, Climate Change Policy Partnership, Duke University, November.

⁹ Aguire B., Eisenhardt L., Lim C., Nelson B., Norring A., Slowik P., Tu N., (2012). *Lifecycle Analysis Comparison of a Battery Electric Vehicle and a Conventional Gasoline Vehicle*, California Air Resources Board, June. Cai Z., Ou X., Zhang Q., Zhang X., (2012), Full lifetime cost analysis of battery, plug-in hybrid and FCEVs in China in the near future, *Frontiers in Energy*, **6**, 2, pp. 107–111. McCullough R. (2012). Are Electric Vehicles Actually Cost-Effective, *Electricity Policy.com*, pp. 1-10. Alexander M., Davis M., (2013), *Total Cost of Ownership Model for Current Plug-In Electric Vehicles*, EPRI Technical Report. Jun M., Di Muro (2013). Holistic Methodology to Analyze EV Business Models, *International Journal of Innovation, Management and Technology*, **4**, 2, pp. 259-264.

clients semblent avoir une préférence pour une mono-technologie au moment de décider d'une chaîne de traction automobile. Ce critère est évidemment associé à celui de fiabilité technique, qui détermine la durabilité et le coût de maintenance-réparation, et de sécurité tant de la conduite que des approvisionnements. La présence d'un réseau maillé de stations-services pour les carburants pétroliers donne à ces derniers un fort avantage en ces domaines. Il faudra que les alternatives électriques garantissent des performances comparables.

En termes comportementaux, les premiers retours d'information des propriétaires de Renault Zoe et Twizy tendraient à montrer un taux de satisfaction, du fait de l'absence de bruit et de la facilité de conduite, à des niveaux très supérieurs, 98 %, à ceux enregistrés dans le passé pour de nouveaux modèles innovants. Et la grande majorité déclare ne jamais revenir à la technologie à combustion interne !

Si la performance environnementale d'un groupe motopropulseur donné n'est pas encore en fait un vrai critère de décision, la plupart des experts de l'industrie pensent que les sentiments écologistes devraient prendre de l'importance dans le futur. En tout état de cause, il faut différencier les performances du véhicule non seulement au moment de l'utilisation, ou performance instantanée, de celle du puits à la roue. Et en la matière, les solutions partiellement ou totalement électriques doivent être évaluées en toute transparence. En effet, tout dépend du « mix » énergétique de la production d'électricité. Dans certains pays, comme la Chine, le Etats-Unis et l'Allemagne, qui utilisent encore massivement le charbon, les hybrides rechargeables et les véhicules à batteries ont des émissions de CO₂ plus élevées que les véhicules conventionnels.

Dans les pays où la part de l'énergie nucléaire est forte, les véhicules électriques et hybrides rechargeables sont évidemment performants. Mais il convient de souligner que le basculement d'une part significative du parc automobile vers les véhicules tout électrique à batteries pose le problème de la capacité des réseaux électriques, non seulement en voltage et donc en section des lignes de basse tension, mais aussi, et on pourrait dire surtout, en capacité de production. A titre d'exemple, on estime qu'un parc de 3 millions de véhicules électriques requiert un *Evolutionary Pressurized Reactor* (EPR) de plus et 6 à 7 EPR pour une électrification de tout le parc. Les oppositions à l'énergie nucléaire comme le coût et les délais de construction de tels équipements sont un obstacle sérieux à un tel scénario.

3. L'industrie automobile

Quels enseignements peut-on tirer d'un balayage complet de la documentation technique et une centaine d'entretiens en profondeur avec des cadres en charge de la stratégie produit et de la R&D des constructeurs (Toyota, GM, Chrysler, Nissan, Renault, Peugeot-Citroën, Daimler-Benz, BMW, Fiat, Hyundai, Kia), de grands laboratoires de recherche publics et privés, d'organisations professionnelles à but non lucratif spécialisées, de sociétés de transport et des administrations publiques sur l'environnement, de fabricants de composants innovants (batteries, piles à combustible, unités de contrôle électronique) en Chine, au Japon, en Europe et aux Etats-Unis ?

La recherche est qualitative, enquête sur un phénomène courant dans un contexte de vie réelle afin de conserver les caractéristiques holistiques et significatives d'événements de la vie réelle¹⁰. Relevant de l'analyse de la technologie et de l'innovation, il est l'expression d'un ensemble d'opinions et n'est évidemment pas scientifiquement adapté à la généralisation, car il n'est pas basé

¹⁰ Yin (2009). *Case study research: Design and methods* (3rd ed.). Beverly Hills, CA: Sage Publishing.

sur une méthode de prévision technologique reconnue tels que Delphi, l'élaboration de scénarios ou les prévisions probabilistes¹¹.

Une première conclusion est le large consensus parmi les personnes interrogées selon lequel la concurrence entre le véhicule tout électrique et la conception dominante du moteur à combustion interne (ICE) est encore loin d'être jouée sur les cinq facteurs suivants : consommation d'énergie, autonomie, émissions de CO₂, prix d'achat et coûts d'utilisation (figure 3).

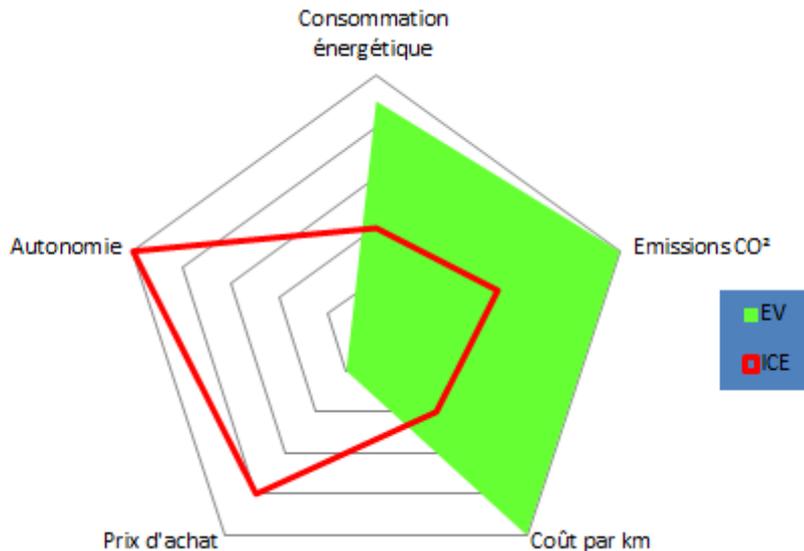


Fig. 3 : Avantages comparatifs entre véhicule électrique et ICE

Des facteurs d'ordre technique mais aussi comportemental pourront faire progresser la voiture électrique vers une autonomie plus acceptable. Des facteurs politiques comme des subventions ainsi que l'accroissement des volumes produits peuvent jouer pour faire évoluer son prix d'achat dans le bon sens. Mais d'autres facteurs peuvent redonner au moteur conventionnel quelques couleurs en termes de coûts d'usage : un prix en baisse et une disponibilité garantie en produits pétroliers ou des avancées significatives en matière de dépollution et de consommation énergétique.

Quarante ans après une première recherche menée en 1972-1973 sur l'innovation dans l'automobile, il convient de rester prudent et modérément optimiste¹². La capacité de résistance de cette industrie est remarquable. La demande mondiale va croissant alimentée par le renouvellement des parcs mais aussi par l'accès à l'automobile dans les pays émergents (figure 4). Sur longue période, elle ne donne aucun signe de retournement durable. Et les besoins de motorisation des pays en développement sont énormes.

¹¹ Jantsch E., (1967), *Technological Forecasting in Perspective*, – *La prévision technologique*, Paris, OECD-OCDE, downloaded from http://www.diact.gouv.fr/IMG/File/Prevtech_EN.pdf.

¹² Chanaron J.J. (1973), *L'innovation dans la construction automobile*, Thèse de doctorat, IPEPS/IREP, Grenoble, novembre.

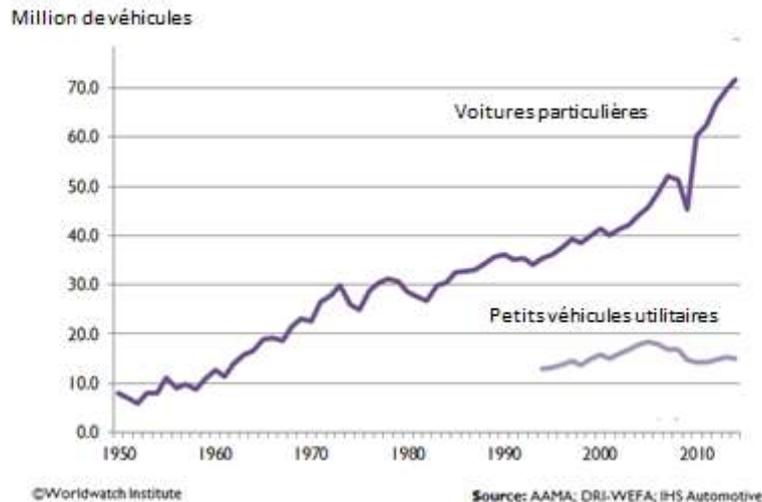


Fig. 4 : Production de voitures et utilitaires légers

L'industrie automobile, dans sa configuration actuelle, constitue un véritable système qui implique de nombreuses activités toutes interdépendantes, même si elles peuvent avoir parfois des intérêts contradictoires : assemblage, composants et équipements, commerce et réparation, carrosseries-remorques et caravanes, production et distribution de carburant, construction et entretien des routes, administrations publiques, transports routiers, assurances et financement, sports et presse, entre autres¹³. En France, environ 10 % de la population active est directement ou indirectement dépendant du système !

C'est une industrie mature avec des technologies parfaitement maîtrisées et encore perfectibles en terme de consommation énergétique et de pollution, de savoirs et de savoir-faire difficiles à acquérir sans passer par les grands acteurs traditionnels. Ce sont aussi des investissements industriels fixes gigantesques et, pour l'instant, incontournables, gérés par des groupes industriels emblématiques, peu nombreux et peu disposés à laisser des « entrants » contrarier leurs positions acquises, déjà malmenées par leur propre jeu concurrentiel. Ce sont, enfin, des entreprises en totale « dépendance de sentier » vis-à-vis de la technologie dominante, qui ne maîtrisent pas bien, en général, les technologies alternatives non issues du système technique métal-mécanique qui a fait leur fortune¹⁴. Dans un tel contexte, il n'est pas étonnant d'observer que la technologie met de longues années à évoluer, non seulement à cause de sa complexité mais aussi de la capacité de résistance des acteurs.

¹³ de Banville E., Chanaron J.J., (1985), *Le système automobile français : de la sous-traitance au partenariat ? Eléments pour une problématique*, CPE .Etude, n° 56, mai.

¹⁴ Chanaron J.J., Bye P., (1995), Technology Trajectories and Strategies, *International Journal of Technology Management*, 10, 1, pp. 45-66.

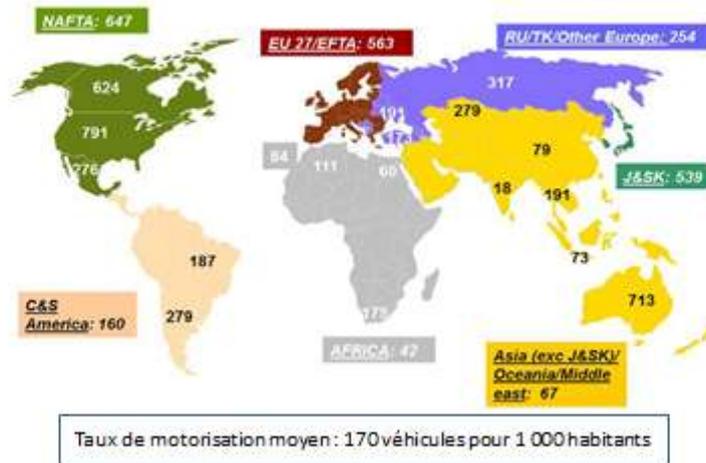


Fig. 5 : Des taux de motorisation très inégaux

Enfin, le système automobile est un outil de politique économique puissant non seulement dans les pays constructeurs tels que Chine, Etats-Unis, Japon, Allemagne, Italie, Corée du Sud, Brésil et autres, par les emplois directs et indirects concernés mais généralement dans tous les pays à motorisation croissante par les revenus fiscaux liés à l'acquisition et l'utilisation des véhicules (figure 5). Le jeu des lobbys est à cet égard édifiant : c'est ainsi que l'Allemagne, pays où le sentiment écologique est le plus fort, mais aussi où l'industrie automobile est florissante (Volkswagen, BMW, Daimler-Benz) est un des rares pays à ne pas avoir mis en place un système d'incitation fiscale pour les voitures propres. Le gouvernement allemand attend sans doute que ses groupes nationaux lui en donnent le feu vert pour ne pas voir leurs concurrents français et japonais prendre des parts de marché et apparaître comme innovateurs et plus écologistes !



Fig. 6 : La Renault Eolab à 1,3 litre aux 100 km

La solution basse consommation à technologie hybride qui fait les beaux jours du Mondial de l'Automobile 2014 avec de 1,3 à 2 litres aux 100 km est-elle à même de décaler de quelques décades l'émergence de la voiture électrique et donner ainsi le temps pour qu'émerge une solution à hydrogène (figure 6) ?