



Article : 065

Les sources d'énergie pour l'automobile du futur : les développements en cours

CHANARON Jean-Jacques

nov.-15

Niveau de lecture : Peu difficile

Rubrique : Usages de l'énergie

Face à une concurrence croissante dans un contexte de forte incertitude associée à la globalisation et à des crises économiques fréquentes ainsi qu'aux pressions pour des solutions écologiques donc libérées des énergies fossiles, les industries manufacturières matures, au premier rang desquelles se place l'industrie automobile, cherchent des innovations de rupture qui pourraient contribuer à leur survie, et, le cas échéant, leur procurer des avantages concurrentiels durables. Dans quel sens ?

1. Brève histoire de la motorisation des véhicules

Depuis plus d'un siècle, le moteur à combustion interne (*Internal Combustion Engine –ICE*) a été le design dominant pour propulser les véhicules et l'industrie automobile a été longtemps considérée comme statique et fortement opposée à des innovations radicales¹. Il est bon de rappeler que, pourtant, aux origines de l'automobile, ce sont la vapeur, puis l'électricité qui s'imposent comme source d'énergie de l'automobile. En novembre 1881, G. Trouvé présente une automobile électrique à l'Exposition internationale d'Électricité de Paris. La voiture électrique connaît un succès certain dans la dernière décennie du 19^e siècle, tant en Europe, et notamment en France, qu'aux États-Unis, remplaçant les fiacres et autres voitures à traction animale.

Pour la course Paris-Bordeaux-Paris de 1895, une voiture électrique de C. Jeantaud est sur la ligne de départ et quatre ans plus, la Jamais contente, de C. Jenatzy, dépasse pour la première fois les 100 km/h en atteignant 105,88 km/h, le 29 avril 1899.



Fig. 1 : Voiture électrique de C. Jeantaud

C'est l'invention théorique du cycle à quatre temps par Beau de Rochas en 1862 qui permet d'exploiter véritablement le moteur à explosion. L'allemand N. Otto devient en 1872 le premier ingénieur à appliquer les principes de Beau de Rochas, selon un cycle désormais connu sous le nom de « cycle Otto ». En 1876, l'ingénieur allemand G. Daimler développe, pour le compte de la firme Deutz, le premier moteur fixe à gaz fonctionnant sur le principe présenté par Beau de Rochas. En 1883, le français É. Delamare-Deboutteville fait circuler une voiture dont le moteur est alimenté au

¹ Chanaron J.J., (1998). *Managing Innovation in European Small and Medium-Sized Enterprises*, Nijmegen Lectures on Innovation Management, Nijmegen Business School, Maklu-Uitgevers, Antwerpen.
Chanaron, J.J., Bardou, J.P., Laux, J., Fridenson, P., (1982), *The Automobile Revolution, The Impact of an Industry*, University of North Carolina Press, Chapel Hill.

gaz. Il remplace le gaz par du carbure de pétrole en inventant un carburateur à mèches. Ce véhicule circule pour la première fois début février 1884 et le brevet est officiellement enregistré le 12 février 1884, ce qui fait de lui l'inventeur de l'automobile à essence. Mais il faut attendre 1889 pour que R. Panhard et É. Levassor installent le premier moteur à quatre temps, celui de Daimler, sur une voiture à quatre places. En janvier 1891, Panhard et Levassor font déjà rouler dans les rues de Paris les premiers modèles français équipés du moteur Benz. Ce sont les premières voitures à moteur à explosion commercialisées.

La compétition entre les deux technologies alternatives, essence contre électricité, s'intensifie. En 1900, sur 4 192 véhicules fabriqués aux États-Unis, 1 575 sont électriques, 936 à essence, et 1 681 à vapeur. Puis peu à peu, l'essence et le gazole supplantent définitivement l'électricité du fait des défauts intrinsèques de la voiture électrique en comparaison des avantages de la technologie des voitures à essence². Pour J.B. Rae, « il était inéluctable que ces dernières s'imposent ».

Les deux chocs pétroliers de 1973 et de 1978, les progrès techniques sur les batteries et les piles à combustible et les prémisses des mouvements antipollution sont l'occasion d'une relance active des recherches sur la voiture électriques³. Mais les nombreux projets font long feu face aux progrès des voitures à moteur à combustion interne en termes de consommation énergétique et d'émissions de polluants.

Depuis le début des années 2000, les spécialistes de cette industrie, chercheurs, consultants et dirigeants, considèrent que des changements radicaux sont désormais nécessaires pour réduire les émissions de CO₂, un facteur majeur du réchauffement climatique, et la dépendance au pétrole et aux combustibles fossiles. Un consensus semble aujourd'hui s'établir sur une transition inéluctable vers de nouvelles sources d'énergie. Quelles sont donc les chances d'une rupture technologique ?

² Rae, J.B., (1955). The Electric Vehicle Company: A Monopoly that Missed, *Business History Review*, 29, 4, pp. 298-311

³ Chanaron J.J., de Bonnafos G., de Mautor, L. (1983) *L'Industrie Automobile*, Paris, La Découverte Maspero, coll. Repères, n° 11.

2. Les options innovantes en voie d'émergence

Le modèle d'innovation à quatre systèmes [article 066] autorise la création d'un cadre d'évaluation des options innovantes de référence qui sont en train d'émerger dans le secteur de la voiture particulière (tableau 1).

Tableau 1 : Les différentes alternatives de propulsion

ICEV	Véhicule à moteur à combustion interne	Véhicule à moteur à essence ou à moteur diesel
AICEV	Véhicule à moteur à combustion interne avancé	Véhicule à moteur utilisant de nouveaux carburants : bio-carburants, gaz naturel, gaz de pétrole liquéfié, hydrogène
HEV	Véhicule hybride électrique	Véhicule utilisant un moteur ICE et un moteur électrique
PHEV	Véhicule hybride électrique "Plug-in" ou rechargeable	HEV avec système de recharge des batteries
ERHEV	Véhicule hybride électrique avec système d'allongement de l'autonomie	Véhicule électrique et des batteries recharges par un petit moteur
FPBEV	Véhicule tout électrique à batteries	Véhicule électrique utilisant seulement des batteries
FCEV	Véhicule électrique à pile à combustible	Véhicule électrique utilisant seulement un pile à combustible

Dans chaque catégorie, plusieurs variantes peuvent exister. Par exemple, la pile à combustible pour véhicule électrique peut fonctionner avec un réservoir d'hydrogène ou assurer l'approvisionnement en hydrogène à la demande avec la production à bord de l'hydrogène. Chaque technologie est décrite à l'aide d'une grille exposée in [article 066].

2.1. Les véhicules à technologie ICE traditionnelle

Selon les constructeurs et équipementiers automobiles, et dans tous les marchés, l'automobile traditionnelle est toujours considérée comme susceptible d'améliorations substantielles de sa consommation énergétique et de ses rejets polluants. C'est bien le sens de l'ambitieux objectif assigné par les autorités gouvernementales françaises : disposer dans dix ans de véhicules consommant 2 litres d'essence aux 100 km. Ce souhait a été formalisé et porté au rang de projet d'intérêt collectif au sein de la Plateforme de la Filière Automobile (PFA) sous le nom « véhicule 2 L/100 km et connecté ».

Le principal axe de travail porte sur les moteurs. En à peine 5 ans, les véhicules commercialisés en Europe ont vu leur consommation baisser de 10 à 15 %. Un résultat qui s'explique par la réduction

de la cylindrée (*downsizing*), la gestion thermique du moteur, la récupération d'énergie au freinage et la généralisation du *Stop & Start*. Il y aurait encore de la marge car, selon les experts, des améliorations de 40 à 50 % seraient possibles. Ainsi J. Syrota estime à 30 à 40 % le potentiel de gain en consommation de carburant⁴. L'Institut Français du Pétrole Energies Nouvelles (IFPEN) juge que l'objectif des 2 L/100 km est un objectif ambitieux mais réalisable. Il faudra également réduire le poids des véhicules. L'IFPEN rappelle qu'une diminution de 100 kg permet une baisse des émissions de CO₂ de 5 g par kilomètre. L'idéal serait de descendre à 800, voire 700 kg, peut-être moins encore.

Cette voie semble prometteuse : c'est ainsi qu'au Mondial de l'Automobile en octobre 2014 Citroën va dévoiler le concept C4 Cactus Airflow 2L, censé afficher une consommation théorique de 2 litres aux cent kilomètres. Le véhicule recourt à la technologie "*Hybrid Air*" : une mini-motorisation à essence 3 cylindres, un système de stockage d'énergie sous forme d'air comprimé et un ensemble composé de deux moteurs-pompes hydrauliques. L'aluminium et le carbone l'allègent de 100 kg par rapport à un petit break surélevé de série. Il reste à prouver à l'usage la réalité de ces performances, d'autant que les calculs ont été opérés selon des normes d'homologations qui seraient éloignées de la réalité⁵. Au même moment, Renault a dévoilé l'Eolab qui affiche 1 litre au 100 km.

Plusieurs spécialistes interrogés ont d'ailleurs indiqué qu'un tel « *downsizing* », s'il était appliqué à tous les véhicules neufs dans les dix ou quinze prochaines années et partout dans le monde, renouvelant ainsi le parc dans sa quasi-totalité, soit 1,2 milliard de véhicules en 2014, reculerait de plusieurs dizaines d'années le fameux « pic pétrolier mondial » qu'aucun expert prend aujourd'hui le risque de dater (figure 2). D'autant plus que l'exploitation des gaz de schistes a déjà démontré qu'un tel recul était bien possible ! Pour l'instant, les dégâts environnementaux associés à cette exploitation par fracturation hydraulique pourraient bien d'ailleurs devenir plutôt un frein potentiel à la survie définitive des moteurs ICE.

Le moteur à combustion interne restera probablement la technologie dominante pour encore des décennies en raison de ses avantages évidents, non seulement parce que c'est une technologie étonnamment efficace et très rentable par rapport aux solutions de recharge, mais aussi parce que l'infrastructure est universellement disponible.

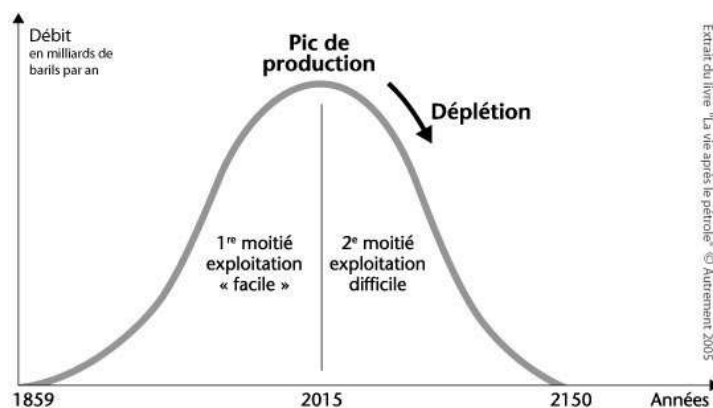


Fig 2 : Le pic pétrolier

⁴ Syrota J., (2008), *Perspectives concernant le véhicule "grand public" d'ici 2030*, Centre d'Analyse Stratégique, Le Point, Paris, 28 septembre.

⁵ La tribune, 18/09/2014.

2.2. Les véhicules à technologie ICE avancée

L'ICE à technologie avancée est, en effet, l'option à court terme favorite des constructeurs et des équipementiers, notamment parce qu'elle induit des changements relativement limités sur le véhicule et l'infrastructure de distribution de l'énergie. La technologie est disponible et économiquement viable. Cette option est celle dictée par l'inertie de la trajectoire technologique – ou dépendance de sentier – de l'industrie telle qu'elle a prévalu jusque-là⁶.

Tableau 2 : Caractéristiques du moteur à gaz naturel

Acceptabilité politique, sociale et culturelle	Facteur clé	Niveau de développement	Statut actuel	Perspective à long terme
	Performance CO ²	Très bonne	Excellente	Excellente
	Dépendance aux carburants fossiles	Totale	Totale	Réserves pour au moins 100 ans mais géographiquement distribuées
	Infrastructure	Excellente	Différent selon les pays	Relativement facile et bon marché à développer
Possibilité technologique	Performance d'ensemble	Totale	Totale	Excellente
	Sécurité	Bonne	Bonne	Bonne
Opportunités de commercialisation	Acceptation par les consommateurs	Relativement bonne	Encore quelques résistances pour sécurité	Devrait s'imposer
	Prix	Corrélié au trend du prix du pétrole	Subventionné par certains gouvernements	
Faisabilité industrielle	Coût	Bonne	Petit premium sur les moteurs classiques	Prix devraient s'aligner avec les économies d'échelle
	Engineering	Bonne	Bonne	Devrait s'améliorer
	Fourniture de composants	Kit CNG disponible	Totalement disponible	

Il s'agit de moteurs à combustion interne qui peuvent utiliser le gaz naturel, dénommés GNV ou Gaz Naturel pour Véhicule (tableau 2), les biocarburants (tableau 3) et même différentes combinaisons, y compris le mélange de biocarburants ou de l'hydrogène et de l'essence ou du diesel dans des proportions définies. Cette option pourrait également comporter des composants

⁶ Chanaron J.J., Bye, P., (1995), Technology Trajectories and Strategies, *International Journal of Technology Management*, 10, 1, pp. 45-66.

innovants afin d'optimiser les performances du moteur en termes d'émissions et de consommation d'énergie. Cette option permet également des adaptations régionales, puisque le gaz naturel et les sources de biocarburants ne sont pas également répartis géographiquement. Les pays ayant une réserve de gaz naturel (États-Unis, Russie, Iran, entre autres) vont probablement se concentrer sur le GNV alors que les pays disposant de vastes ressources agricoles ou forestières (États-Unis, Brésil) pourraient soutenir le développement des biocarburants.

Le moteur à gaz naturel comprimé est évidemment une option attractive puisque le ravitaillement pourrait être réalisé au domicile dans les pays où il existe un réseau de distribution national. Mais en ce qui concerne le gaz à effet de serre, cette option est toujours problématique, même si, selon l'Agence de Protection de l'Environnement (EPA) américaine, par rapport aux véhicules traditionnels, les véhicules fonctionnant au gaz naturel comprimé amèneraient des réductions des émissions de monoxyde de carbone de 90 à 97%, et une diminution des émissions de dioxyde de carbone de 25%. Les émissions d'oxyde d'azote peuvent être réduites de 35 à 60%, et les rejets émissions d'hydrocarbures autres que le méthane de 50 à 75%.

Tableau 3 : Caractéristiques des bio-carburants

Acceptabilité politique, sociale et culturelle	Facteur clé	Niveau de développement	Statut actuel	Perspective à long terme
	Performances CO ²	Très bonne	Excellente	Excellente
	Dépendance aux carburants fossiles	Aucune	Aucune	
	Concurrence nourriture/transport	Mauvaise	Mauvaise	Progrès en rendement et efficacité
	Infrastructure	Bonne	Bonne	Relativement facile et bon marché à développer
	Ecologie	Requiert des semences génétiquement modifiées	Pauvre	Opposition durable
Possibilité technologique	Performance d'ensemble	Totale	Totale	Excellente
	Sécurité	N'est pas un problème		
	Matières premières	Limitations	Limitations	Ouverture de nouvelles : algues, paille, plantes exotiques, déchets
Opportunités de commercialisation	Acceptation par les consommateurs	Relativement bonne	Bonne	
	Prix	Bonne	Subventionnée par les gouvernements	Devrait s'améliorer avec les économies d'échelle
Faisabilité industrielle	Coût	Relativement bon marché		Devrait diminuer avec les économies d'échelle
	Production	Nouvelles infrastructures à construire	En construction au Brésil, aux USA et en Europe	Devrait se développer rapidement dans certaines régions

Les biocarburants sont également une solution très attractive en théorie. Mais leur déploiement massif devra nécessiter de lourds investissements dans les installations de production ainsi que la libération d'immenses terres agricoles. En fait, les biocarburants sont au centre de dures polémiques nationales et internationales et pour de nombreuses questions : face à la diminution des niveaux d'émissions de CO₂ et à la montée, jugée inéluctable, des prix du pétrole, se posent les débats «nourriture contre carburant», la déforestation et l'érosion des sols, l'impact sur les ressources en

eau. Leur déploiement massif exigera également des plantes génétiquement modifiées (OGM) afin d'atteindre des niveaux élevés de productivité, ce qui ne peut manquer de renforcer les oppositions politiques radicales à ces semences dans de nombreux pays.

2.3. Les véhicules électriques hybrides (HEV)

Il en existe plusieurs familles.

2.3.1. La technologie hybride de première génération

Depuis le succès de la Toyota Prius, lancée en 1997 et vendue depuis à près de 4 millions d'unités dans ses différentes versions et à près de 6 millions d'unités avec les déclinaisons sur l'ensemble de sa gamme, la voiture hybride est une des alternatives vraiment crédibles à l'ICE classique. Il existe déjà une abondante littérature académique⁷ qui discute de son rendement du puits à la roue et de ses performances économiques et techniques, notamment quant à la réduction des émissions de CO₂.

Les troisième et quatrième générations de Prius ont été des succès commerciaux, en particulier aux États-Unis et au Japon, mais le marché européen a été en deçà des attentes. Il est évident que la technologie actuelle a des avantages limités en ce qui concerne les émissions CO₂ et la consommation de carburant, limitation due en particulier à la faible autonomie permise par les batteries utilisées par Toyota en mode électrique seul.

L'avantage technologique des véhicules hybrides essence-électrique actuels (tableau 4) est plus faible en Europe en raison du taux élevé de pénétration du diesel. Mais aux États-Unis, la différence de consommation et d'émissions de CO₂ est d'environ 25-30% en raison de la taille moyenne de la flotte.

Lorsque l'on regarde les chiffres de vente réels, notamment aux États-Unis où plus de 3 millions d'hybrides ont été commercialisés depuis 1999, la croissance est évidemment rapide et devrait probablement rester exponentielle pour quelques années encore (figures 3 et 4). Il reste que les ventes de HEV sont encore marginales dans le total des nouvelles immatriculations, 3,2 % en 2013, et dans les parcs de véhicules en circulation. Au Japon, en 2012, il y avait 2,9 millions de véhicules hybrides soit un peu moins de 3 % du parc total (figure 5). En utilisant une extrapolation exponentielle, la part de marché devrait atteindre 5% du parc total au Japon en 2016-2017.

Lors d'un exercice de prévision réalisé en 2009, en utilisant les données de ventes de véhicules hybrides aux États-Unis sur la période 2000-2007, les prévisionnistes avaient envisagé des ventes de

⁷ Chanaron J.J., Teske J., (2007), The hybrid car: a temporary step, *The International Journal of Automobile Technology & Management*, Vol. 7, n°4, pp. 268-288. Alamgir M., Sastry A.M., (2008), Efficient Batteries for Transportation Applications, SAE, *Convergence 2008 Conference*, 20-22 October, Detroit, paper 08CNCVG-0036.

près de 2 millions d'unités par an en 2015-2016, soit 6 à 8 % des immatriculations totales. Utilisant les données 2000-2013, on constate que la progression est en fait beaucoup plus modeste et que les ventes sont très sensibles aux fluctuations conjoncturelles.

Tableau 4 : Caractéristiques des voitures hybrides

Acceptabilité politique, sociale et culturelle	Facteur clé	Niveau de développement	Statut actuel	Perspective à long terme
	Impact environnemental	Faiblement amélioré		Peut-être amélioré par des nouvelles générations de petits moteurs et de batteries
	Dépendance aux carburants fossiles	Forte	Forte	Devrait réduire avec la diminution de la taille des moteurs
	Infrastructure	Excellente	Disponibilité totale	Ne semble pas poser problème
Possibilité technologique	Performance d'ensemble	Bonne	Similaire au moteur ICE actuel	Ne devrait pas changer substantiellement
	Autonomie	Limitée	<20km en électrique	La batterie Lithium-Ion devrait être améliorée
	Performances CO ²	Limitée	Amélioration ≤10-15%	Peu d'espoir d'amélioration
	Performance en consommation de carburant	Limitée	5-10% in Europe 15-30% in the US	Espoir limité d'amélioration
			≤	
Opportunités de commercialisation	Acceptation par les consommateurs	Modérée	Préférence pour une chaîne cinématique mono-énergie	Devrait augmenter avec les changements de comportement
	Prix	Un peu plus élevé	Premium de 2 000 à 2 500€	Devrait diminuer avec les volumes
Faisabilité industrielle	Coût	Supérieur	>10-15%	Devrait diminuer avec les économies d'échelle et de variété
	Engineering	Plus complexe	Sous contrôle de peu de constructeurs	Devrait s'améliorer rapidement
	Production	Facile		Le module électronique est le composant clé
	Qualité	Equivalente	Equivalente	

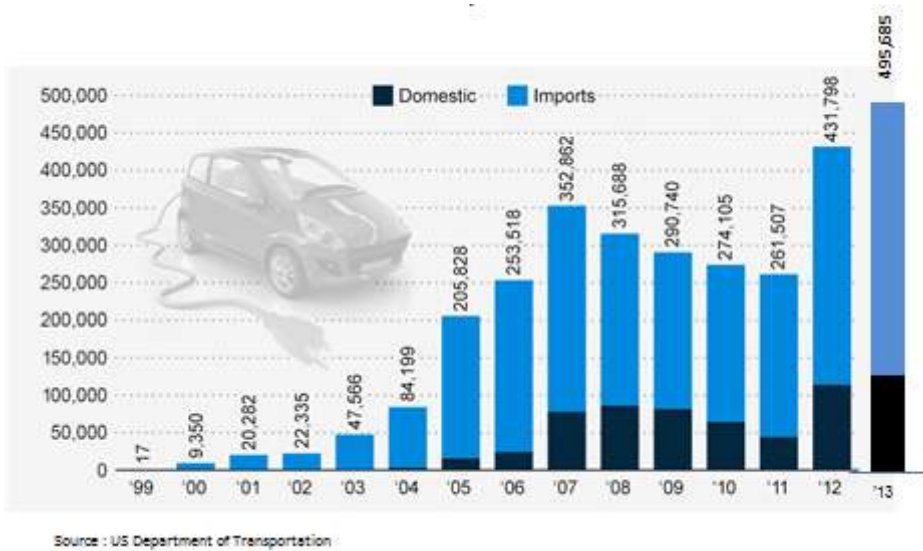


Fig. 3 : Ventes de véhicules hybrides aux USA par année

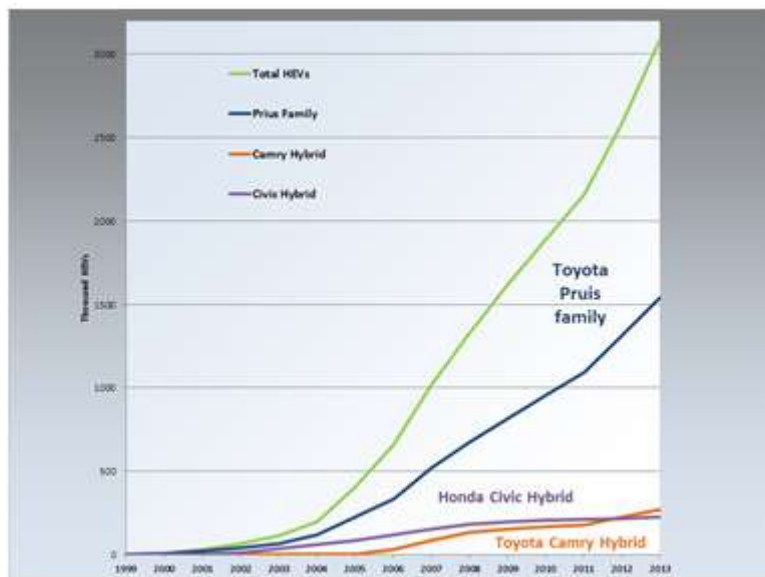


Fig. 4 : Ventes cumulées de véhicules hybrides aux USA par modèle

2.3.2. Les véhicules hybrides rechargeables

Les véhicules hybrides rechargeables ont l'avantage considérable de bénéficier d'une beaucoup plus grande autonomie que la technologie de première génération en mode tout électrique. Ils ont aussi l'avantage d'être considérés par les parties-prenantes de l'industrie automobile, y compris les clients utilisateurs, comme une première étape vers des véhicules tout électrique à batterie ou à pile à combustible. Même Toyota, qui a été le véritable innovateur de la technologie hybride de première génération, a reconnu que cette technologie est une solution intermédiaire et ne devrait durer que quelques décennies, les hybrides rechargeables remplaçant les premiers modèles hybrides progressivement, jusqu'à ce que les performances des batteries ou des piles à combustible rencontrent toutes les exigences techniques et économiques des consommateurs [articles 018 et 058].

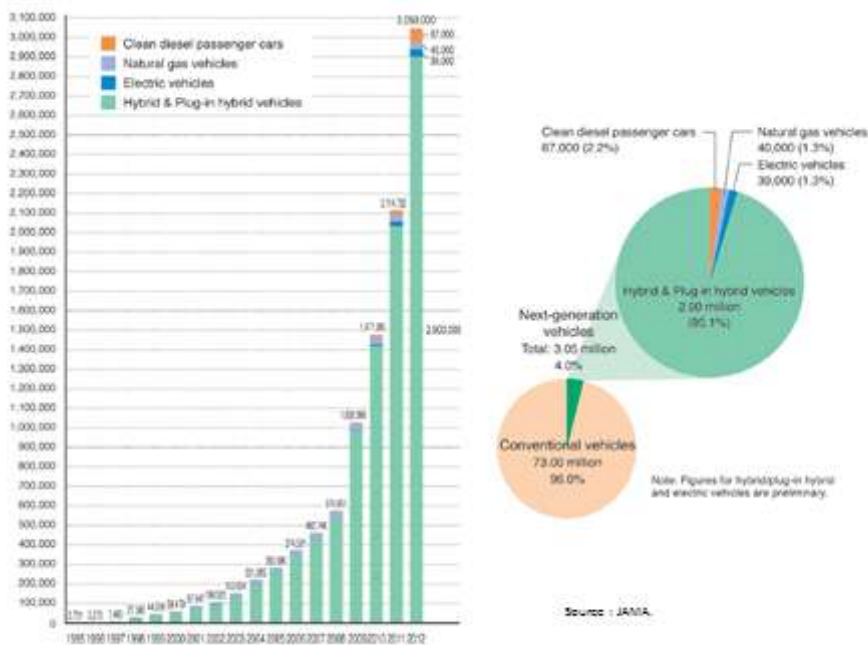


Fig. 5 : Le parc de véhicules propres au Japon en 2013

Alors qu'elle avait été annoncée pour 2009, Toyota a été contrainte de décaler de plusieurs années la commercialisation d'une quatrième génération de Prius avec un système « *plug-in* » (tableau5). Dotée d'une autonomie tout électrique de 23 km, elle est disponible depuis 2012 seulement et ne représente qu'une faible proportion des ventes. Les spécialistes les mieux informés avancent l'argument selon lequel des tests approfondis, notamment au synchrotron de Grenoble, sur les batteries Lithium-Ion ne donnaient aucune garantie de qualité et de fiabilité, stabilité dans le temps et durabilité, aux scientifiques et techniciens japonais.

Tableau 5 : Les générations de Toyota Prius

	Type	Production
Première génération	Prius I (type NHW10)	1997-2003
Deuxième génération	Prius II (type NHW20)	2004-2009
Troisième génération	Prius III (type ZVW30)	Depuis 2009
Quatrième génération	Prius IV	Début 2015

Même s'il ne fait aucun doute que leur part de marché va encore croître de manière significative au cours des dix prochaines années, il semble désormais acquis que les scénarios les plus optimistes pour les hybrides et qui ont fait référence considérant cette technologie comme dominante avec plus de 90% des nouvelles immatriculations autour de 2025 ne seront jamais vérifiés⁸. Et l'hypothèse défendue par J. Syrota suggérant que l'hybride *plug-in* est la seule solution viable avant 2030 semble aujourd'hui totalement erronée. Il est clair que le goulot d'étranglement technologique reste la batterie et la soi-disant « autonomie tout électrique » qui est la seule variable susceptible de faire changer durablement et profondément le comportement des consommateurs face à la préservation de l'environnement et la diminution de l'usage des combustibles fossiles.











2.3.3. Le véhicule électrique hybride à autonomie allongée (Extended Range)

Il s'agit d'une troisième option dans le portefeuille de la technologie hybride. Le véhicule devrait fonctionner sur sa chaîne de traction électrique et utiliser un petit moteur à combustion interne ou tout autre dispositif (air comprimé, par exemple) pour la recharge des batteries. Ce choix a été fait par General Motors (GM) pour la Chevrolet Volt disponible depuis 2010⁹ (Stanek, 2008). Sur la batterie seule, la Volt peut fonctionner environ 60 kilomètres et 500 km avec le système d'extension d'autonomie. Les ventes de Volt ont été très décevantes par rapport aux prévisions initiales (tableau 6) : 68 228 unités vendues entre 2009 et avril 2014. Il faut y rajouter un peu plus de 9 000 Opel Ampera vendues en Europe entre fin 2011 et avril 2014. En année pleine, comme par exemple 2013, les ventes de Volt ont représenté 0,15 % des immatriculations aux Etats-Unis !

⁸ Crozet Y. (2005), *Pollution locale et effet de serre dans les transports : Impacts et technologies, Prospective 2050 des Transports*, LET-ENERDATA, PREDIT, Paris. Heywood J., & al., (2008), *On the Road in 2035*, MIT, July. Ce même Heywood (2008) a également soutenu fortement les options hybrides et a prévu une part de 8% du marché en 2015, 20% en 2025 et 40% en 2035. Les grands bureaux de conseil (IBM, McKinsey, Arthur D. Little, Gartner Group) estiment en moyenne à 10 % des ventes annuelles d'ici 2020. Syrota J. op. cit.

⁹ Stanek, M.B., (2008), *Plugging-in: GM's Chevy Volt*, General Motor, Environment and Energy Policy and Commercialization, New Orleans, 17th November.

Tableau 6 : Immatriculations de Chevrolet Volt par pays entre 2010 et juin 2014

Pays	Total 2010-2014 ⁽¹⁾	Total 2014 ⁽¹⁾	Total 2013	Total 2012	Total 2011	Total 2010
 USA	63 167	8 615	23 094	23 461	7 671	326
 Canada	3 262	831	931	1 225	275	n.a.
 Pays-Bas	1 060	2	745	306	7	
 Suisse	223	34	71	92	26	
 Australie	216	35	101	80	n.a.	
 Grande-Bretagne	90 ⁽²⁾	-	23 ⁽²⁾	67	n.a.	
 Allemagne	73	0	25	23	25	
 France	57	0	15	42	n.a.	
 Belgique ^l	40	0	3	37	n.a.	
 Suède	40	0	7	33	n.a.	
Total	68 228	9 517	25 015	25 366	8 004	326

Notes: (1) CYTD: current year-to-date sales through June 2014. (2) Sales in the UK through June 2013 - Source : Wikipédia.

2.4. Le véhicule électrique à batteries

La voiture électrique alimentée par des batteries électrochimiques, on l'a vu, est antérieure à la voiture à moteur à combustion interne mais les avantages de rendement, d'autonomie et de coûts¹⁰ de ce dernier l'ont emporté sur ceux de la voiture électrique, pourtant largement soulignés à l'époque : absence de vibration, d'odeur et de bruit, démarrage immédiat, entre autres.

Après une première phase de renouveau d'intérêt suite aux chocs pétroliers de 1973 et 1978, bien éphémère, les pressions pour réduire fortement le poids des combustibles fossiles et la réduction des émissions de CO₂, source du réchauffement climatique, ont remis en vogue les chaînes de traction tout électrique à batteries hautes performances. C'est le développement des batteries à base de lithium, essentiellement sous l'impulsion des fabricants d'ordinateurs portables et de téléphones cellulaires, qui a permis un tel renouveau d'intérêt de la part des constructeurs automobiles, Renault et Nissan en tête, puis peu après l'ensemble des grandes marques, des pouvoirs publics, un peu partout dans le monde, prêts à subventionner, le démarrage de la filière, et des laboratoires de recherche publics incités à augmenter les budgets affectés à l'électrochimie et aux nouveaux matériaux (figure 6).

¹⁰ En 1912, un roadster électrique était vendu pour 1 750 dollars tandis qu'une voiture à essence était vendue 650 dollars.

Il existe cependant encore de nombreux freins, voire des obstacles à l'adoption généralisée des véhicules électriques à batteries. Le principal semble être les performances des batteries, c'est à dire la densité d'énergie (Wh/kg), la densité de puissance (W/kg) et le nombre de cycles de recharge. En effet, en l'état actuel des technologies, pour un réservoir de 36 kg de gazole (pour moteur diesel) auquel il faut rajouter 7 kg pour le réservoir lui-même, soit un volume total de 46 litres, il faudrait 540 kg de cellules lithium-ion (830 kg au total avec les enveloppes) pour un volume total de 700 litres avec un véhicule à rendement énergétique équivalent (mesuré en énergie massique et densité).



Fig. 6 : Deux voitures électriques emblématiques

Des progrès sont encore attendus sur les différentes filières à base de lithium. Les chercheurs du Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL) aux États-Unis viennent de démontrer des améliorations importantes des propriétés des batteries lithium-soufre qui jusque-là avaient la fâcheuse tendance à se dégrader rapidement et à présenter un nombre de cycles de recharges limité à 300 environ.

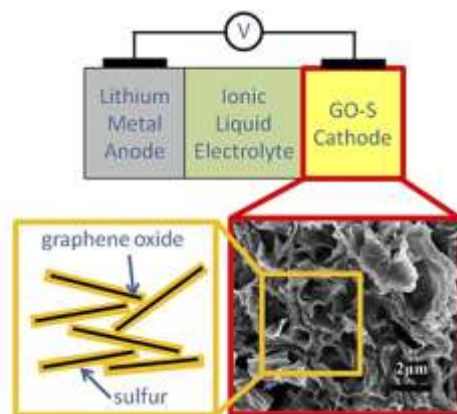


Fig. 7 : La batterie Li-S du Lawrence Berkeley National Laboratory - Source : <http://eetd.lbl.gov/news/article/57182/holistic-cell-design-by-berkeley>.

L'expérience, encore en laboratoire, a mis au point une batterie lithium-soufre qui a plus de deux fois l'énergie spécifique des batteries lithium-ion, et qui dure plus de 1 500 cycles de charge-décharge avec décroissance minimale de la capacité de la batterie. C'est la plus longue vie de cycle signalé jusqu'ici pour la batterie lithium-soufre (figure 7).

Selon le LBNL, pour des véhicules électriques visant une autonomie de 500 kilomètres, la batterie doit fournir une énergie spécifique au niveau des cellules de 350 à 400 watts-heures par kilogramme (Wh/kg), soit le double de l'énergie spécifique (environ 200 Wh/kg) des batteries lithium-ion actuelles. Les batteries devraient également avoir au moins 1 000, et de préférence 1 500 cycles, de charge-décharge sans perte de puissance ou de capacité de stockage notable.

Pour une voiture roulant 12 000 km par an et dont la batterie serait volontairement limitée à une autonomie de 200 km, il n'y aurait besoin que de 75 recharges environ par an, soit 8 ans pour atteindre 1 000 recharges. Il faut cependant souligner que le passage du stade du laboratoire à la production en grandes séries prendra plusieurs années, au moins dix selon les responsables du LBNL.

En tout état de cause, laboratoires de recherche, fabricants de batteries et constructeurs automobiles font feu de tout bois pour augmenter les performances des batteries (figure 8). Renault et son partenaire Nissan, qui ont été les premiers « grands » constructeurs à offrir des véhicules à batteries de série dans leur gamme, ont annoncé un doublement de l'autonomie de Renault Zoe et Nissan Leaf d'ici 2016. Or la Renault Zoe de 2014 a une autonomie « moyenne » de 140 km, que les « meilleurs » conducteurs parviennent à porter à 170 km mais que les « moins bons » conducteurs réduisent à 110 km !

Un autre obstacle majeur est le facteur "*gaz-up*", c'est à dire le temps nécessaire pour recharger complètement la batterie, des recharges partielles pouvant réduire sa durée de vie. On compte aujourd'hui des stations de recharge dite « normale » avec lesquelles il faut de 3 à 4 heures pour une recharge complète. Des stations de recharge rapide, soit environ 30 minutes, sont en cours de développement industriel, en France par Schneider Electric notamment, et devraient être déployées sur les corridors autoroutiers principaux en Europe. Le constructeur californien de voitures électriques de luxe, Tesla, déploie actuellement son superchargeur Tesla qui recharge son modèle S en 30 minutes pour 270 km d'autonomie. Un superchargeur peut recharger environ la moitié de la batterie en 20 minutes.

Selon le constructeur, qui annonce pouvoir disposer de nouvelles batteries offrant plus de 600 km d'autonomie d'ici 2015-2016, tous les modèles S équipés d'une batterie de 85 kWh peuvent utiliser des superchargeurs, tout comme les véhicules équipés de batteries de 60 kWh. Des superchargeurs seront positionnés à des emplacements stratégiques et pratiques le long des axes routiers les plus fréquentés à travers l'Europe. Les superchargeurs sont gratuits et le resteront pour les propriétaires de modèle S.

Il faut aussi compter sur les freins sociaux et culturels qui, pour l'instant, retardent sans aucun doute, une adoption plus massive des véhicules à batteries. Les résultats parlent d'eux-mêmes : les ventes annuelles sont toujours marginales : 46 000 véhicules tout électrique vendus aux Etats-Unis en 2013 dont 17 650 Tesla soit 0,5 % des ventes de voitures particulières. En France, en 2013, 8 779 véhicules électriques particuliers ont été immatriculés sur l'année dont 5 511 Renault Zoé, 1 438 Nissan Leaf, 658 Bolloré Bluecar avec 658 immatriculations et 478 Smart Fortwo. ont également progressé avec 478 immatriculations. Au total, les ventes ont progressé de 50 % par rapport aux 5 663 immatriculations enregistrées en 2012. Cela représente moins de 0,5 % des immatriculations totales de voitures particulières auxquelles on peut ajouter un peu plus de 5 200 utilitaires légers, sur un total de 365 000 ventes.

On estime le parc mondial à 500 000 véhicules en juin 2014, dont 200 000 aux Etats-Unis, 75 000 au Japon, 40 000 en Chine, 30 000 en France et aux Pays-Bas, soit 0,04 % du parc total.

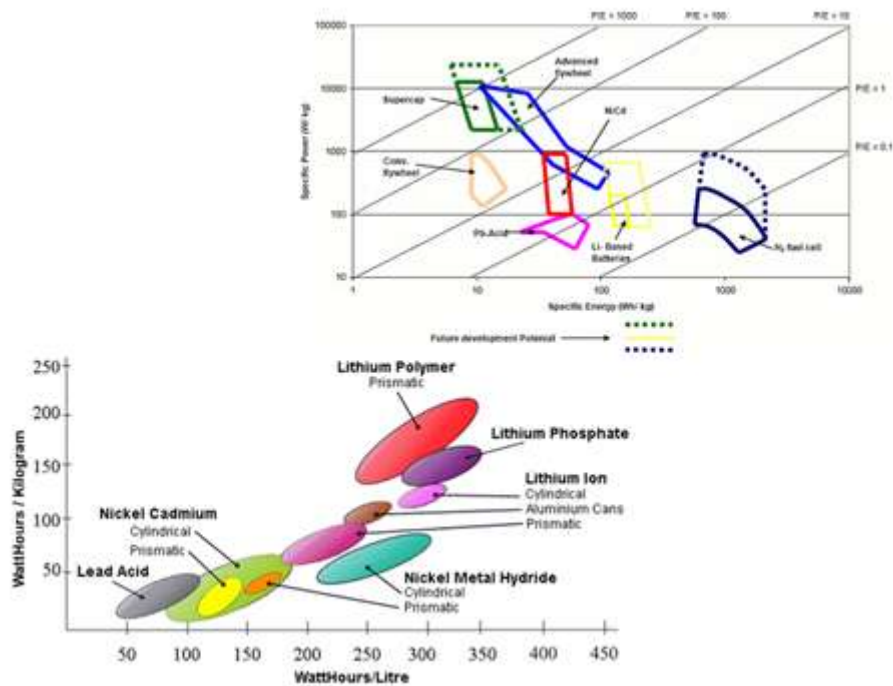


Fig. 8 : Les potentialités d'améliorations des batteries

Dans la plupart des pays, de telles ventes ont été « soutenues » par des incitations financières publiques substantielles. Sans de telles subventions, il est permis de penser que les ventes auraient été limitées à quelques milliers de clients, « adopteurs précoces » de nouvelles technologies vertes. Il faudra maintenir voire renforcer encore le soutien public. Les observateurs attribuent le bond spectaculaire des immatriculations de voitures électriques en Norvège depuis le début de 2014, plus de 12 % des ventes, aux subventions, à la gratuité des péages, du stationnement et des ferrys, à la présence massive de bornes de recharge et à l'autorisation de rouler dans les couloirs réservés aux autobus.

Une inconnue de taille pour les batteries au lithium, rarement évoquée par les parties prenantes, réside dans la disponibilité et le prix de cette matière première (figures 9 et 10). Le lithium est bien moins abondant que les alcalins et alcalino-terreux usuels (Na, K, Mg, Ca) et il n'existe, en concentration permettant une exploitation économique rentable qu'en très peu d'endroits. Le prix du carbonate de lithium a triplé entre 2000 et 2013 pour se stabiliser à 6 000 dollars par tonne. Certains experts contestent l'estimation des réserves publiée par le United States Geological Survey (USGS) et font valoir que la situation géopolitique dans les pays producteurs, notamment la Chine et la Russie, peut également avoir une forte influence. A quoi, il faut ajouter que le recyclage du lithium est possible et que les quantités augmentent régulièrement avec la construction d'usines de recyclage.

	Production 2012	Réserves	Ressources identifiées
Etats-Unis	2 700	38 000	5 500 000
Argentine	2 700	850 000	6 500 000
Australie	13 000	1 000 000	1 700 000
Bésil	490	46 000	180 000
Chili	13 000	7 500	7 500 000
Chine	6 000	3 500 000	5 400 000
Portugal	820	10 000	n.d.
Zimbabwe	500	23 000	n.d.
Bolivie			9 000 000
Total Monde	37 000	13 000 000	45 000 000
Unité : tonne.			

Source : U.S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries, January 2014.

Fig. 9 : Production et réserves mondiales de lithium

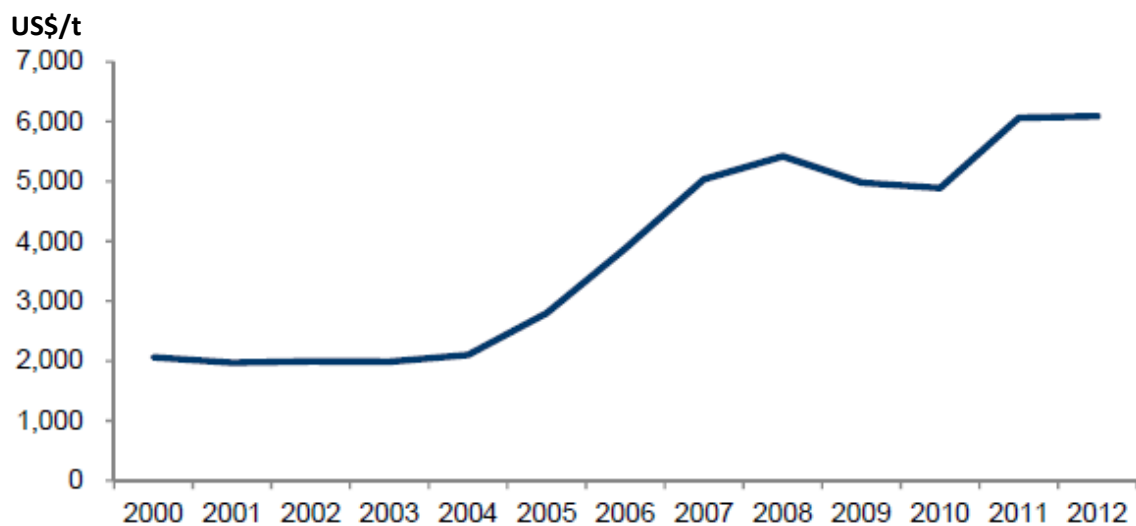


Fig. 10 : Evolution du prix du carbonate de lithium - Source : Fox-Davies Resources, http://www.globalstrategicmetalsnl.com/_content/documents/405.pdf, 2013.

Selon de nombreux scientifiques et la majorité des experts de l'industrie, le chemin sera encore long avant qu'un groupe motopropulseur à base de batteries hautes performances puisse réellement rivaliser avec le moteur à combustion interne classique qui, de son côté, va évidemment progresser en efficacité énergétique et environnementale. Décidément, il sera long et difficile de battre l'essence et le gazole.

Tableau 7 : Caractéristiques du véhicule électrique à batteries

Acceptabilité politique, sociale et culturelle	Facteur clé	Niveau de développement	Statut actuel	Perspective à long terme
	Impact environnemental	Excellent	Excellent	
	Dépendance aux carburants fossiles	Excellente	Excellente	
	Infrastructure	Faible	Faible	Stations de recharge et réseau électrique à améliorer t
Possibilité technologique	Performance globale	Pauvre par rapport à celle du moteur ICE	Limitée	Doit être améliorée substantiellement
	Autonomie	Limitée	Environ 100-150km	Les batteries Lithium-Ion semblent pouvoir être améliorées substantiellement (X2)
	Durabilité/Nombre de cycles de recharge	Relativement bons	Encore insuffisants en conditions réelles d'usage	Doivent être améliorés substantiellement
	Temps de recharge	Long	Trop long sauf recharge nocturne au domicile	Doit être réduit radicalement
	Infrastructure de recharge	Peu disponible	A élargir et réseau électrique à booster	Doit être amélioré et étendu
	Performances CO ²	Limitée quand l'énergie primaire provient de combustibles fossiles	Pauvre aux US et en Chine Meilleur dans les pays nucléarisés	
	Performance énergétique	Bonne	Bonne	Devrait être améliorée
	Options technologiques	Prototypes	Assez peu nombreuses	R&D fondamentale et appliquée requise
Opportunités de commercialisation	Acceptation par les consommateurs	Relativement faible	Préférence pour le pétrole	Devrait bénéficier des changements comportementaux
	Prix	Elevé	Premium élevé sans	Le prix devrait baisser avec les

			subvention	volumes
	Maintenance/Réparation	Bonne	Coûteuse si changement des batteries	Devrait être améliorée
Faisabilité industrielle	Coût	Un peu plus cher	Un peu plus coûteuse	Devrait baisser avec les volumes
	Matières premières	Satisfaisant	Lithium disponible	Prix et disponibilité du lithium incertains
	Engineering	Plus simple que ICE	Sous contrôle des constructeurs et fabricants de batteries	Devrait être encore amélioré
	Production	Relativement facile	Encore indisponible pour de forts volumes	La production de batteries est un facteur clé
	Qualité	Quasi-équivalente	Quasi-équivalente	A améliorer pour les batteries

2.5. Le véhicule à pile à combustible

Depuis au moins trois décennies, la pile à combustible à hydrogène comme alternative au moteur à combustion pour l'automobile a été le rêve quasi-universel pour les scientifiques et les ingénieurs en recherche et développement des laboratoires publics et des constructeurs automobiles sans autre résultat tangibles que de simples prototypes¹¹. Les recherches tant fondamentales qu'appliquées continuent cependant à un rythme très élevé, avec un nombre croissant de brevets déposés aux Etats-Unis, en Europe, en Chine, au Japon et en Corée du Sud¹²

Une pile à combustible est un dispositif électrochimique de production d'électricité à partir d'un carburant (du côté de l'anode) et un oxydant (du côté de la cathode), qui réagissent en présence d'un électrolyte [article 018]. Contrairement aux piles classiques qui fonctionnent en circuit fermé, la pile à combustible fonctionne en circuit ouvert et « brûle » de l'hydrogène. Pour les usages automobiles, la pile à hydrogène utilise de l'hydrogène comme combustible et de l'oxygène (habituellement de l'air) comme agent oxydant.

De toute évidence, le coût unitaire des piles à combustible pour groupe motopropulseur, qui est aujourd'hui très élevé, va progressivement diminuer. Selon les prévisions de Daimler, il pourrait être, à long terme, un peu plus onéreux que les moteurs à combustion interne dits « avancés » mais moins cher que les systèmes hybrides, du fait de la double motorisation.

Toyota a annoncé qu'il commercialisera sa première berline à pile à combustible "zéro émission" d'ici au mois d'avril 2015 au Japon, au tarif de 50 000 euros hors taxes, soit sans doute au prix d'une forte perte unitaire, puis en Europe¹³. Honda suivra quelques mois plus tard. Ils suivent le coréen

¹¹ Chanaron J.J., (1994), Perspectives de la voiture électrique : les leçons de l'histoire, *Revue de l'Energie*, numéro spécial Energie, Transports, Environnement, n° 463, novembre, pp. 627-635.

¹² Chanaron J.J., (2014), Recent Advances on the Design of Batteries and Fuel Cells for Automobiles, *Recent Patents on Mechanical Engineering*, 7, 2, pp. 113-121.

¹³ A-G. Verdevoye, La Tribune, 25/06/2014.

Hyundai avec un peu de retard qui a commercialisé depuis juin 2014, mais en location longue durée (LLD), son ix35 Fuel Cell à 500 km d'autonomie pour 365 euros par mois (figure 11).



Le concept Toyota FCV



Le Hyundai ix35 Fuel Cell

Fig . 11 : Deux modèles à pile à combustible disponibles sur le marché en 2015

L'hydrogène est un gaz difficile à stocker en raison de sa faible densité, de sa forte volatilité et de sa capacité de fuite par les moindres fissures (Beeker, 2014). Sa température de liquéfaction à -253°C et la liquéfaction nécessite beaucoup d'énergie (environ 50 % du contenu énergétique). En l'état actuel des technologies, seul le stockage gazeux semble praticable pour permettre une autonomie comparable à celle offerte par le pétrole : il faut alors un réservoir de 150 litres, pesant 100 kg avec une pression à 700 bars. Un tel réservoir coûterait 2 000 euros. Une pression à 350 bars réduit d'autant l'autonomie ou bien requiert un réservoir plus volumineux [article 058].

La grande majorité des observateurs considèrent que le marché des voitures à pile à combustible ne devrait pas se développer réellement avant 2025 tant sont encore prégnantes les incertitudes, voire les blocages, technologiques, économiques et socio-politiques associés à la « société de l'hydrogène », bien que celle-ci soit souvent présentée comme l'énergie du futur. Les principaux goulets d'étranglement sont associés au prix des matériaux, notamment le platine, et des composants tels que les membranes et à la production et la distribution d'hydrogène compressée ou liquide et aux défaillances des membranes.

Tableau 8 : Les caractéristiques des véhicules à pile à combustible

Acceptabilité politique, sociale et culturelle	Facteur clé	Niveau de développement	Statut actuel	Perspective à long terme
	Impact environnemental	Excellent	Excellent	Grande série pas avant 2020
	Dépendance aux carburants fossiles	Aucune	Excellente	Parfaite
	Sécurité	Faible	Faible du fait des fuites de H^2 et au remplissage	A améliorer
	Infrastructure	Faible	Faible	Enorme besoin pour la production et la distribution de H^2
Possibilité technologique	Performance globale	Faible, loin des niveaux attendus	Limitée : problèmes en climat froid, durée de vie inconnue	Devra être améliorée substantiellement
	Autonomie	Bonne	Environ 500-	L'autonomie

			600km	devrait augmenter
	Durabilité/Nombre de cycles	Relativement bonne	Encore en question en conditions réelles d'usage	Devra être améliorée substantiellement
	Anode et membranes	Pauvre	Anodes en platine très chères, membranes peu résistantes à haute température	Requiert de la R&D fondamentale et appliquée
	CO ² Performances	H ² à produire dans centrales sans combustible fossile	Bonne	
	Performance énergétique	Bonne	Efficienc 30 to 50%	Devrait être améliorée substantiellement
	Options technologiques	Production On-board de H ² ou H ² liquide	Encore en développement	
Opportunités de commercialisation	Acceptation par les consommateurs	Relativement faible	Préférence pour le pétrole	Devrait bénéficier des changements comportementaux
	Prix	Très élevé	Premium très élevé sans subvention ou vente à perte	Le prix devrait baisser avec les volumes
	Maintenance-Réparation	Bonne	Coûteuse si changement de pile	Devrait être améliorée
Faisabilité industrielle	Coût	Très élevé	Aucune donnée publique mais anode en platine très chère	Devrait diminuer avec les économies d'échelle et de variété
	Engineering	Complexe	Sous contrôle de rares groupes industriels	Devrait être amélioré assez vite
	Production	Complexe	Confidentielle	La production des piles est un élément décisif
	Qualité	Equivalente	Equivalente	