

PAR JEAN PERSONNAZ (91)



PSA Peugeot Citroën
responsable
des architectures
systèmes

L'électrification des véhicules : une tendance mondiale de fond

En 2011, l'électrification des véhicules est enfin engagée de façon pérenne. Quelles que soient les prévisions de parts de marché qui seront au final réalisées en 2020, elles seront significatives. Il n'y a pas de solution unique et chacun propose des produits adaptés à ses bases industrielles, à l'image de ses marques, ou aux spécificités locales. Ces ruptures technologiques, industrielles, et économiques, sont rendues possibles par l'émergence d'exigences environnementales fortes.

triques en 2003), soit sous la forme de promesses d'acquisitions pour les flottes des administrations (cas de la France à l'époque avec EDF, La Poste, les Régions, avec les limites que l'on connaît). Quels sont les éléments qui ont changé la donne et qui vont permettre aujourd'hui de résoudre l'équation associée à ce type de produits ? Pourquoi et comment les barrières technologiques, industrielles, et surtout économiques vont-elles progressivement être levées ?

Toyota lance la Prius

C'est Toyota qui fait bouger les frontières technologiques et industrielles de l'automobile avec, en 1997, la sortie de la première génération de Prius. Début des années 1990, la Direction générale de Toyota engage une réflexion sur la voiture du XXI^e siècle : peut-on survivre durablement en se contentant de développer et produire des voitures comme celles d'aujourd'hui ? Le programme G21 (Global 21) s'organise dès le départ autour de deux notions clés : la disponibilité des ressources naturelles et le respect de l'environnement. Il donne naissance au premier véhicule hybride de grande série après une comparaison minutieuse des différentes options (*set-based concurrent engineering*).

La pile à combustible et le gaz naturel ont notamment été écartés : maturité technique et industrielle insuffisante pour la première, difficulté de distribution du carburant pour le second. Des moyens humains et financiers exceptionnels sont investis en interne pour le développement et l'industrialisation des composants stratégiques au meilleur état de l'art : machines électriques synchrones à aimants permanents, électronique de puissance avec IGBT (*Insulated Gate Bipolar Transistor*, les interrupteurs de puissance qui permettent de transformer la tension continue de la batterie en tension alternative pour piloter la machine électrique) conçus spécifiquement. Seule la

REPÈRES

De 1996 à 1999, General Motors a produit 1 200 véhicules électriques sous la marque Saturn. Entre 1995 et 2005, PSA Peugeot Citroën a vendu près de 10 000 véhicules électriques : Saxo, 106, Berlingo, Partner avec un véritable dispositif industriel. À la même époque ont été lancés de nombreux projets de véhicules hybrides qui ont avorté ou ont été à peine commercialisés (Audi Duo en 1997, Nissan Tino en 1998, Honda Insight 1^{re} génération en 1998).

■ Les principaux constructeurs automobiles mondiaux ont tenté à plusieurs reprises de se lancer dans le développement ou la commercialisation de véhicules électriques ou hybrides. Le développement de ces véhicules au bilan économique très défavorable avait été engagé avec le soutien des États, soit sous la forme de participation aux dépenses (cas des États-Unis avec le DOE, *Department of Energy*, dans le cadre des programmes PNGV, *Partnership for a Next Generation of Vehicle*, avec plusieurs centaines de millions de dollars à la clé contre l'engagement des constructeurs à commercialiser 10 % de véhicules élec-

Peut-on
survivre
durablement
en se
contentant des
voitures
d'aujourd'hui ?

La Toyota Prius

Plus de 2 millions de véhicules produits dans le monde fin 2010 dont 40 % au Japon, 50 % aux USA et seulement 10 % en Europe. Plus de 300 000 véhicules en 2009.

Une architecture originale : la dérivation de puissance.



Trois générations : 1997 (120 g/km CO₂), 2003 (104 g/km), 2009 (89 g/km).

Capacité à évoluer en mode électrique pur sur 1 à 2 km à vitesse inférieure à 50 km/h et à faible accélération depuis la deuxième génération (mode ZEV pour *Zero Emission Vehicle*).

Prix de vente en France, entre 25 000 et 30 000 € selon les options, hors bonus écologique.

batterie de traction nickel métal hydrure (NiMH) intègre un partenaire externe : Panasonic qui *via* la création pour l'occasion de la *joint venture* PEVE à 50/50 fournit les cellules. Le véhicule est nouveau – exclusivement hybride –, fiable, ses performances adaptées au seul marché japonais et son prix de revient élevé. C'est cependant le début d'une *success story*, avec plusieurs générations et autant d'améliorations qui se succéderont.

Réponse globale

Pourquoi ce succès de l'hybride ? Au-delà de l'attractivité du concept (modernité, image « verte », silence de fonctionnement, confort à l'utilisation), c'est parce que c'est une réponse mondiale à l'exigence de diminution des émissions de CO₂ et du budget carburant des particuliers et des entreprises. L'hybride permet en effet de réduire de 20 à 30 % les consommations à l'usage (gains d'autant plus élevés que le pourcentage d'utilisation en zone urbaine augmente) et de baisser significativement les niveaux de CO₂ homologués (sachant qu'une consommation de 1 litre aux 100 km correspond à environ 24 g/km de CO₂ pour les motorisations essence et 26,7 pour les Diesel). Sur les marchés où le Diesel est absent, c'est-à-dire tous les marchés mondiaux sauf l'Europe, c'est la seule façon immédiatement disponible d'obtenir des consommations faibles sur des véhicules de tailles moyenne ou grande.

L'attractivité seule du concept ne suffit donc pas : dès que les fondamentaux économiques ne sont pas favorables, les ventes stagnent, chutent, ou ne décollent pas (exemple de l'Europe où à la fois le filtre de l'euro sur le prix des carburants et l'omniprésence du Diesel n'ont pas permis à l'hybride essence de percer véritablement), et il faut une incitation forte qui ne peut être que ponctuelle pour compenser (exemple du Japon avec l'équivalent d'un bonus de plusieurs milliers d'euros).

Les véhicules hybrides ont donc gagné certaines batailles, mais la partie est encore loin d'être jouée. La course à la réduction des émissions de CO₂ et des consommations, engagée

en Europe il y a plusieurs années, connaît une accélération sans précédent sur toutes les zones géographiques : diminution des masses et des surfaces frontales des véhicules, amélioration des traînées aérodynamiques, réduction de la résistance au roulement des pneus, forte évolution des moteurs essence dans le sillage des Diesel (suralimentation, injection directe, *downsizing* avec apparition de moteurs 3 voire 2 cylindres), révolution technologique sur les automatismes avec le déploiement des boîtes de vitesses double embrayage affichant des consommations inférieures aux versions avec boîtes de vitesses manuelles gaz naturel. Les véhicules « conventionnels » parviennent ainsi à atteindre des niveaux de CO₂ spectaculaires : le seuil des 100 g/km n'est plus l'apanage des hybrides, *a fortiori* en Europe avec le Diesel.

Prix de carburants

L'épisode d'augmentation du prix du carburant aux États-Unis (2 \$/gallon en 2005, oscillations entre 2,4 et 3,20 \$ de 2005 à 2007, puis pic à 4,40 \$ en 2008 avant la crise) est révélateur : les ventes de Prius neuves et la valeur d'une Prius sur le marché de l'occasion suivent les fluctuations du prix du carburant.

Dès que les fondamentaux économiques ne sont pas favorables, les ventes stagnent

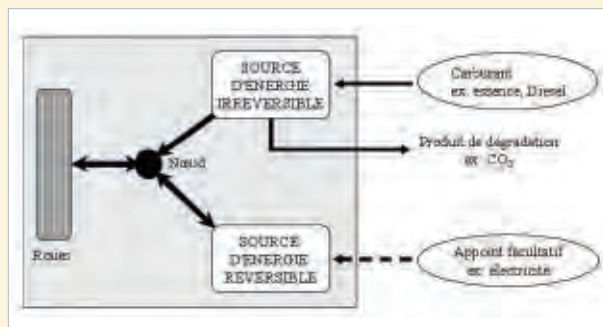
Les principes du véhicule hybride

Le véhicule hybride met à contribution deux sources d'énergie pour assurer sa mobilité : l'une irréversible, typiquement un moteur thermique alimenté par un carburant, l'autre réversible, typiquement une machine électrique et une électronique de puissance alimentées par une batterie.

Ce principe permet d'optimiser son fonctionnement pour chaque situation de vie :

- électrique pur en zone urbaine (arrêts, vitesse et accélérations modérées),
- récupération de l'énergie cinétique dans la batterie en décélération,
- contribution des deux sources d'énergie en accélération.

On distingue deux grandes familles selon que la somme des énergies se fait sous forme mécanique (hybride parallèle) ou électrique (hybride série). Cette dernière est bien connue dans les sous-marins avec pour source irréversible le réacteur nucléaire.



► 2010-2015

Quelles sont donc les tendances 2010-2015 ? On peut distinguer trois courants parallèles : les hybrides sur les versions haut de gamme et très haut de gamme (lieu privilégié pour introduire de nouvelles technologies au prix de revient élevé) ; l'élargissement de l'offre milieu de gamme avec la recherche de ratios prestations-coût total de possession (TCO)¹ attractifs ; l'apparition de véhicules électriques aboutis.

Haut de gamme

Les constructeurs spécialistes du très haut de gamme, tenus de présenter des émissions de CO₂ décentes sur leurs véhicules phares (terrain de jeu habituel entre 200 et 300 g/km, voire au-delà) se sont lancés avec plus ou moins de succès dans les hybrides : Lexus avec la RX450H, Mercedes et BMW en coopé-

ration (Classe S et Série 7 en *mild hybrid*, Classe ML et X6 en *full hybrid*), VAG et Porsche en coopération (VW Touareg, Audi Q7, Porsche Cayenne), avec des offres exclusivement en essence qui avoisinent ou dépassent les 100000€.

Solutions chères

Adaptées aux marchés américains ou chinois, les voitures hybrides haut de gamme arrivent tout juste à afficher les mêmes consommations que les versions Diesel conventionnelles en Europe pour plusieurs dizaines de milliers d'euros supplémentaires.

Milieu de gamme

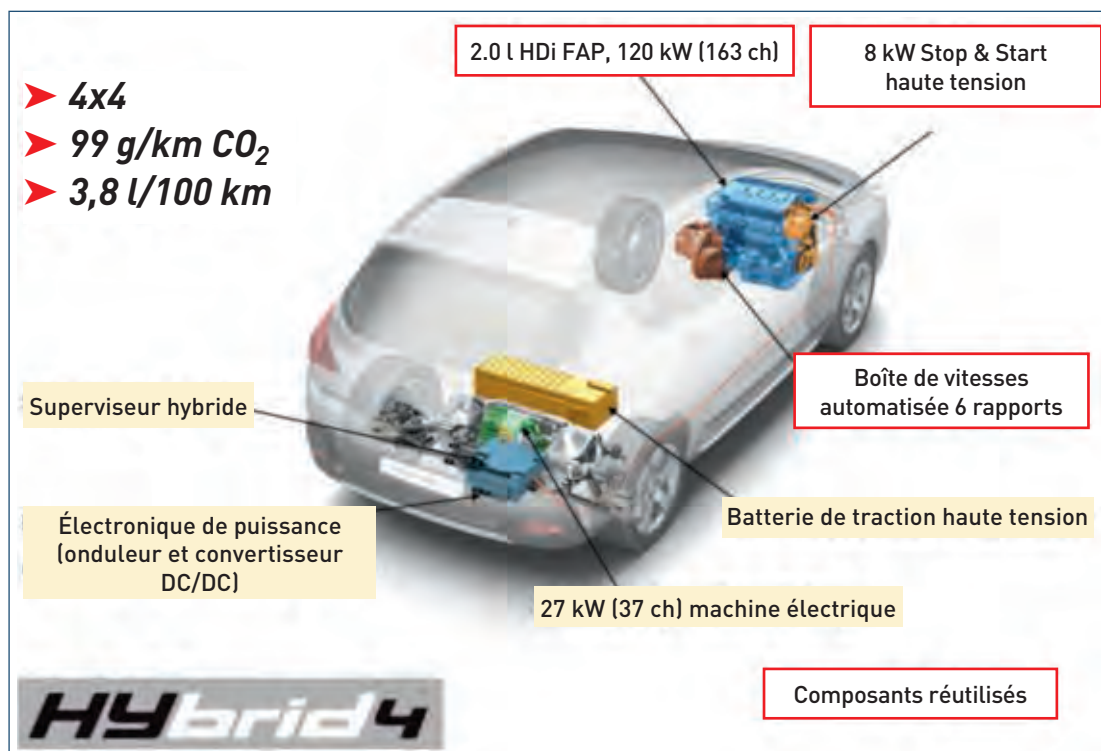
Les deux leaders historiques du domaine hybride, Toyota et Honda, déclinent leurs chaînes de traction sur des véhicules milieu de gamme et proposent un équipement minimaliste avec des prix très agressifs : moins de 20000€, par exemple, pour les versions d'appel des Toyota Auris ou Honda Insight. L'objectif est clair : prendre des parts de marché, augmenter les volumes de production des composants stratégiques pour en diminuer les coûts, et poursuivre le cercle vertueux. Il est cependant encore trop tôt pour dire si cette nouvelle étape sera une réussite : le caractère hybride de ces véhicules est peu mis en valeur, contrairement à la Prius, et en Europe,

Véhicule deux pédales

Ce terme désigne les véhicules sans pédale d'embrayage, avec uniquement accélérateur et frein. Il couvre tous les automatismes de boîtes de vitesses : automatique traditionnelle, pilotée, double embrayage, ou à transmission continûment variable (CVT). Ces véhicules représentent en 2010 la moitié des ventes mondiales avec une forte disparité : 20% en Europe, 40% en Chine, 90% aux USA et Japon.

Le marché européen est très exigeant en termes de CO₂

Chaîne de traction hybride sur Peugeot 3008



ils ne se démarquent pas du Diesel. C'est pour créer une rupture supplémentaire que PSA Peugeot Citroën proposera en 2011 une première : une chaîne de traction hybride Diesel qui équipera dans un premier temps la Peugeot 3008 et la future Citroën DS5, avec des niveaux inférieurs à 99 g/km pour des prestations de très haut niveau, cf. figure ci-dessus.

Véhicules électriques

Après plusieurs années d'investissements des constructeurs et des électrochimistes fabricants de cellules (associés la plupart du temps en *joint venture*), la famille des batteries lithium ion arrive enfin à maturité pour l'automobile grand public, notamment en termes de sécu-

rité. C'est le couple électrochimique mature le plus performant en densité énergétique, puissance et rendement. Déjà largement diffusé dans l'électronique ou l'outillage portable, il va permettre de proposer des véhicules électriques performants, sûrs et durables.

Les standards sont en cours d'élaboration au niveau international avec l'ensemble des acteurs de la filière (production et distribution d'énergie, équipements des infrastructures, fournisseurs de matériels électriques ou de services), l'un des points clés dans une logique de déploiement à grande échelle étant de pouvoir optimiser l'utilisation du réseau *smart grid* et réduire au global les émissions de CO₂ (comptabilisation *from well to wheel*, utilisation des sources les moins émissives pendant les heures creuses). Plusieurs modes de commercialisation sont proposés aux particuliers ou aux entreprises : achat classique du véhicule, location avec option d'achat, ou achat du véhicule et location de la batterie. Les investissements programmés sur l'ensemble de la filière (R & D, industrialisation, infrastructures, recyclage) sont énormes, les performances des produits proposés sont attractives, mais quelles que soient les zones géographiques, l'accompagnement des États est nécessaire pour amorcer le cercle vertueux – augmentation des volumes, baisse des prix de revient : incitations fiscales, bonus écologique, ratio minimal de véhicules électriques imposé dans les flottes.

Les investissements programmés sur l'ensemble de la filière sont énormes

Tout électrique

Les Citroën C ZERO et Peugeot Ion, développées en coopération avec Mitsubishi et déjà commercialisées, offrent 150 km d'autonomie réelle. L'alliance Renault Nissan proposera dès septembre 2011 la Fluence et le Kangoo. Plusieurs modes de recharge sont proposés, sur une prise 220 V 16 A où il faut six à huit heures pour recharger totalement la batterie, ou sur une borne de recharge rapide où dix minutes suffisent pour récupérer 40 à 50 km d'autonomie. Renault annonce en France 21 300 €, bonus écologique de 5 000 € déduit, et 79 € par mois pour la batterie sur la Fluence.

► 2015-2020

Quelle est la prochaine étape pour 2015-2020 ? C'est l'hybride *plug-in* : un véhicule polyvalent, capable de s'insérer dans le trafic urbain en mode électrique pur sur plusieurs dizaines de kilomètres, de se recharger sur le réseau comme un véhicule électrique *plug-in*, de réaliser des consommations à l'usage en rupture (de 2 à 3 litres aux 100 kilomètres), de franchir le seuil de CO₂ de 50 g/km, d'effectuer plusieurs centaines de kilomètres en mode hybride sur route et autoroute. Le principe est simple : j'utilise mon véhicule comme un véhicule électrique la plupart du temps en le rechargeant quotidiennement à mon domicile, dans les parkings publics, sur mon lieu de travail, et je passe en mode hybride dès que vitesse et accélération le nécessitent. La mise en œuvre technique est en réalité délicate : c'est un optimum global à obtenir entre les différentes prestations que l'on doit offrir au client d'une part (performances en électrique pur, habitabilité, confort chaud-froid, coût total de possession) et les objectifs fondamentaux des industriels d'autre part (seuil de CO₂, création de valeur, utilisation des installations industrielles existantes, rentabilité). À l'horizon 2015-2020, l'hybride *plug-in* permet de reprendre un coup d'avance (définitif ?) sur les véhicules conventionnels : son prix de revient marginal sur l'hybride non *plug-in* est faible et il permet d'accéder à un autre monde en termes de prestations.

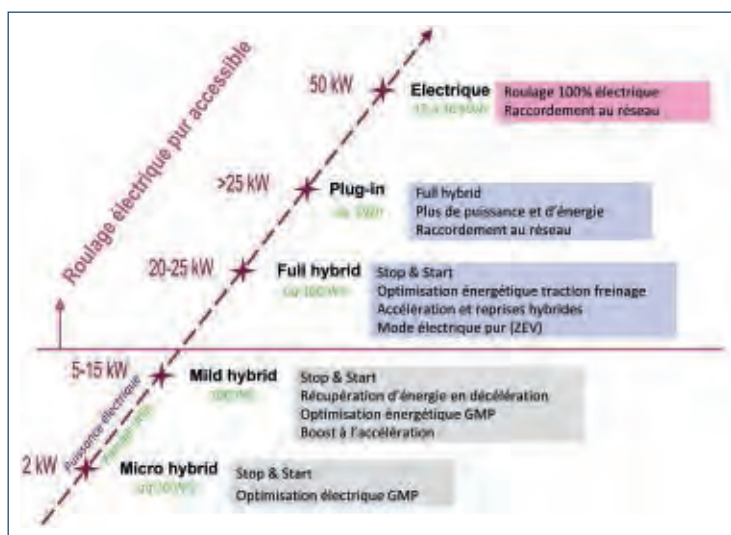
Trouver l'équilibre économique

L'attractivité de l'hybride *plug-in* est réelle. Mais il reste trois conditions pour résoudre la dernière équation, celle de l'équilibre économique : des effets d'échelle sur les composants stratégiques ; un environnement macroéconomique « favorable » ; et un contexte incitatif stable.

Les séries automobiles pour être rentables doivent atteindre sur les principaux composants l'ordre de grandeur de la centaine de milliers d'exemplaires par an, compte tenu des investissements industriels et R&D d'une part, et du prix que les clients sont prêts à payer d'autre part (hormis le cas des véhicules très haut de gamme où le prix de vente constitue une marge d'ajustement appréciable). L'effet d'échelle est donc recherché sur les composants unitaires en les rendant les plus modulaires possibles : des familles de cellules de batteries communes (dimensions, capacité en Ah, type de refroidissement, algorithme de contrôle) assemblées selon différents packs en fonction des besoins des véhicules (puissance, énergie, encombrement), des familles de machines électriques communes (topologie et type d'aimants, diamètre, commande rapprochée) déclinées selon différents niveaux de couple et puissance, des familles d'électronique de puissance communes (classes des composants de puissance notamment IGBT, système d'isolation électrique et d'évacuation des calories, connectique, électronique de commande) adaptées aux fonctions demandées.

L'hybride plug-in permet de reprendre un coup d'avance

Les différents types d'hybrides



Prix des énergies

L'hybride *plug-in* sera d'autant plus intéressant économiquement que le prix du pétrole sera élevé et que le prix de l'électricité restera modéré, notamment en heures creuses. L'équilibre à trois ans de possession se situe aux environs de 2€ par litre de carburant, 10 centimes par kilowattheure pour un client qui effectue 20 000 km par an dont la moitié en zone urbaine, et se recharge 1 à 2 fois par 24 heures, hors week-end. Cette estimation prend en compte le fait que les véhicules non hybrides progressent



Technologies matures

Les technologies nécessaires arrivent à maturité. Constructeurs et équipementiers développent et investissent pour les composants clés : les trois fondamentaux que sont machine électrique, électronique de puissance, batterie, mais aussi des auxiliaires comme le compresseur de climatisation électrique, des résistances pour chauffer l'habitacle, ou des systèmes de freinage qui maximisent la récupération d'énergie cinétique du véhicule.

énormément (voir ci-dessus), l'hybride *plug-in* étant comparé à la référence TCO du marché visé. L'autre donnée macroéconomique fondamentale est le cours des matières premières et la disponibilité des composants primaires, ceux nécessaires à la batterie, mais aussi à la machine électrique (terres rares des aimants produites à 90 % par la Chine) ou à l'électronique de puissance. Les principaux acteurs industriels doivent assurer leurs approvisionnements et mettre en place les filières de recyclage, le rôle de la Chine étant déterminant.

Conditions d'usage

Chaque marché a ses particularités d'usage, avec un dénominateur commun particulièrement favorable à l'hybride : l'extension et la densification des zones urbaines. Le cadre incitatif, nécessaire transitoirement pour accompagner son déploiement, peut être différent en fonction des zones géographiques. Il doit en revanche être décliné dans le temps, en fonction de l'âge des véhicules, et surtout connu à l'avance à l'instar des réglementations sur

Maîtrise des coûts

Afin de limiter les coûts, il faut produire les modules électriques et électroniques là où ils sont utilisés : en Europe pour l'Europe, en Chine pour la Chine, aux États-Unis pour les États-Unis. Tous les constructeurs – Toyota compris – engagent des partenariats pour obtenir ces séries, soit entre eux (coopération VAG-Porsche, coopération PSA-BMW annoncée), soit avec de grands fournisseurs (nombreuses *joint ventures* dans le domaine des batteries). Il y a plusieurs centaines d'euros à la clé sur le prix de revient.

les émissions polluantes. En effet, les cycles de développement sont longs et coûteux même s'ils s'appuient sur une politique modulaire : il faut compter trois à quatre ans pour un programme applicatif complet si l'on veut obtenir un résultat irréprochable en sécurité, fiabilité et maintenabilité vu la complexité des systèmes.

Spécificité européenne

La spécificité de l'Europe est forte : même en *plug-in*, c'est l'hybride Diesel qui tire son épingle du jeu. L'hybride essence *plug-in* n'est jamais rentable par rapport à la référence de marché, toujours Diesel à l'horizon 2015-2020.


Potentiel de progrès

L'électrification de l'automobile est donc en marche. Elle accélère la transformation de ce secteur industriel centenaire en domaine *high-tech* qui n'a plus rien à envier à l'aéronautique ou à l'énergie. Elle ne supplantera pas à moyen terme les véhicules « conventionnels » tant ces derniers progressent, mais occupera une part de marché significative (on admet en général la valeur de 10 % à l'horizon 2020 pour l'ensemble des véhicules électriques et hybrides, soit environ 10 millions d'unités par an). C'est le parallèle avec l'évolution spectaculaire des véhicules conventionnels ces dernières années qui incite à l'optimisme : l'électrification des véhicules porte en elle encore un potentiel de progrès énorme (dans le respect des lois de la physique) et n'est donc pas qu'une phase transitoire de courte durée pour l'automobile mondiale. ■

1. TCO : *Total Cost of Ownership*. Paramètre qui combine prix d'achat, valeur de revente, coût d'utilisation (carburant, assurance, entretien) sur une période de temps généralement de trois ans. Critère n° 1 des gestionnaires de flottes d'entreprises pour le choix des véhicules.

Cadre incitatif

Les approches varient d'une zone à l'autre. Les États-Unis évoquent une autonomie minimale de 30 miles, l'Europe un seuil de 50 g/km de CO₂, la Chine une énergie électrique embarquée (utile, totale ?) de 10 kWh.



Un domaine high-tech qui n'a plus rien à envier à l'aéronautique