Henri Trintignac

Le moteur thermique comparé au moteur électrique

Enjeux et contraintes

Henri Trintignac est président de A&H Conseil, cabinet spécialisé dans le conseil aux dirigeants et aux actionnaires d'équipementiers automobile notamment sur les enjeux liés à la transition énergétique et à la mutation du marché de l'automobile. Il a été auparavant directeur de la stratégie Véhicules Électriques et Hybrides de Valeo ; il a été aussi directeur général des activités Contrôle Moteur Essence et Électronique de Puissance Monde pour successivement SAGEM, JCI puis Valeo ainsi que directeur général de l'activité électronique habitacle Europe de SAGEM et JCI. Ayant une double formation d'ingénieur, Henri Trintignac a exercé différentes fonctions au sein de la direction R&D de Magneti Marelli puis de SAGEM. Henri Trintignac est diplômé de l'ENSPM et de l'ENSAM, il a aussi enseigné à l'ENSPM et à Paris VI.

Ce chapitre est organisé autour de deux thèmes : une **comparaison rapide entre la motorisation électrique et la motorisation thermique**, puis dans un deuxième temps, la généralisation de l'électrification des véhicules et sa contribution à l'abaissement des émissions de CO_2 en automobile[1]. Nous ne traiterons dans

1. Par convention, par « émissions de CO_2 », on entend ici uniquement émissions « du réservoir à la roue ».

ce chapitre que des émissions de CO_2, dites du réservoir à la roue.

1 Motorisation thermique vs. motorisation électrique

1.1. Comparaison entre les moteurs (*Tableau 1*)

Les **puissances spécifiques** sont de mêmes ordres de grandeur entre les moteurs électriques et les moteurs thermiques. Les **rendements** sont par contre assez différents. Un moteur thermique évolue entre 0 % (quand le véhicule est à l'arrêt moteur tournant) et 35 % de rendement au mieux. Pour le moteur électrique, les rendements sont beaucoup plus élevés, entre 60 et 92 %, voire même un peu plus.

Le coût : le potentiel d'évolution du coût est **favorable au moteur électrique**. Un moteur thermique est constitué de 200 à 250 pièces élémentaires, toutes très techniques. Plus de la moitié d'entre elles sont usinées avec des tolérances au micron, reçoivent plusieurs traitements thermiques. On retrouve à l'intérieur d'un moteur électrique environ une cinquantaine de pièces. Pour un groupe motopropulseur thermique, 90 % de la valeur est sous forme de mécanique et 10 % sous forme d'électronique. La proportion est inversée lorsque l'on prend un groupe motopropulseur électrique : on estime aujourd'hui la part de l'électronique à 60 % et celle de la mécanique à 40 %. Or les perspectives de baisse des coûts sont beaucoup plus importantes et rapides en électronique qu'en mécanique. Ainsi il y a vingt-cinq ans, les premiers PC « de base », coûtaient environ 50 000 francs (7 500 €). Aujourd'hui, le PC de base (1 000 fois plus puissant), coûte entre 500 et 750 €, soit environ dix fois moins (en monnaie courante). Dans le même temps, la 205 GTI, il y

Tableau 1

Thermique vs. électrique, quelques chiffres.

Puissance spécifique (kW/kg)	1 à 1,5	2 à 3
Rendement	0 % à 35 %	60 % à 92 %
Nombre de pièces	200 à 250	< 50
Part mécanique/ électronique prix	90/10	40/60

a 25 ans, valait 60 000 francs (9 000 €) et sa remplaçante d'aujourd'hui, la 208 GTI, vaut 25 000 €, soit environ trois fois plus en monnaie courante.

1.2. Comparaison des performances en matière de stockage d'énergie

On retrouve, pour le stockage d'énergie, des ordres de grandeur d'écart entre l'électrique et le thermique, notamment en ce qui concerne les **énergies spécifiques** (***Tableau 2***). Dans un kg d'essence (le diesel serait à peu près équivalent), on trouve 47 300 kJ. Pour une batterie lithium-ion classique, l'énergie spécifique est de l'ordre de 300 à 600 kJ par kg.

Mais c'est la **puissance de charge** qui différencie le plus l'électrique et le thermique. Quand on fait le plein d'un véhicule à essence, on transfère 60 litres en deux minutes soit un demi litre ou 0,4 kg par seconde, ce qui correspond à une puissance de charge de presque 20 MW. La puissance de charge d'une batterie aujourd'hui varie entre 3 et 6 kW pour une charge normale, et de 80 kW pour une charge rapide.

Par ailleurs, le **coût du contenant** de l'énergie (le réservoir d'essence) est de moins d'une centaine d'euros. Par contre, pour une batterie qui donne une autonomie d'une centaine de kilomètres à un véhicule électrique, à 400 € du kWh (le prix couramment admis aujourd'hui), on est plutôt sur 8 000 €.

À l'inverse, le **coût énergétique sur la vie du véhicule** (sur les 100 000 premiers kilomètres) favorise le véhicule électrique. Il est d'environ 9 600 € pour le véhicule thermique et de 1 500 €, en France aujourd'hui, pour le véhicule électrique. À noter que **la somme des coûts du contenant et de l'énergie sur la vie du véhicule sont très proches dans les deux cas.**

Tableau 2

Thermique vs. électrique : le stockage d'énergie.

Énergie spécifique (kJ/kg)	47 300	300 à 600
Puissance de charge (kW)	18 920 0,4 kg/s	3 à 80
Coût « contenant » (€)	< 100	8 000 20 kW·h 400 €/kW·h
Coût énergie 100 000 km (€)	9 600 6 l/100 km 1,6 €/l	1 500 150 W·h/km 0,1 €/kW·h

1.3. Quelles conclusions peut-on tirer de ces comparaisons ?

Que ce soit en matière de performances ou en matière de potentiel de coût, le moteur électrique est un sérieux concurrent au moteur thermique. Par contre, du fait du stockage d'énergie et plus particulièrement de la charge, **le véhicule électrique à batterie n'est pas une alternative au véhicule thermique**. Ceci tient à l'usage auquel l'automobile répond ; une étape de 600 km, suivi d'un arrêt de cinq minutes, pour ensuite repartir. Du fait de la contrainte sur la charge, cet usage n'est pas envisageable avec un véhicule électrique à batterie.

Il n'en serait pas de même pour les véhicules exclusivement utilisés pour des déplacements courts. On estime que 25 % des véhicules neufs vendus en France ne parcourent jamais plus de 80 km. Ils sont le deuxième véhicule d'un foyer et disposent d'un emplacement de stationnement où la batterie peut être chargée. Pour cette part du marché, le véhicule électrique à batterie est une alternative sérieuse au véhicule thermique.

La commercialisation des véhicules électriques demande le développement d'un nouveau modèle d'affaires puisque, si le coût total d'usage du véhicule électrique est comparable avec celui du véhicule thermique, le profil des décaissements dans le temps est en revanche très différent. Le véhicule électrique est vendu neuf avec sa batterie – un investissement très coûteux –, mais que le faible coût du fonctionnement (coût de l'énergie) compense dans le temps. Certains constructeurs proposent de vendre le véhicule électrique sans sa batterie et de louer cette dernière, ramenant le profil des décaissements à celui prévalant avec le véhicule thermique. Ce nouveau modèle d'affaires présente en plus l'avantage pour le client de garantir les performances de la batterie pendant toute la vie du véhicule, et pour le constructeur d'entretenir un lien suivi avec son client, lien qui n'existe pas avec le véhicule thermique.

À la lumière des bénéfices que le constructeur peut tirer du nouveau modèle d'affaires et de la part de marché accessible (25 % tout de même), on comprend mieux pourquoi plusieurs constructeurs automobiles développent une offre de véhicules électriques.

2 Type de motorisation et émissions de CO_2

La réduction des émissions de CO_2 par le transport automobile est devenue un objectif depuis que la réalité de son effet sur le changement climatique est admise. La ***Figure 1*** illustre les efforts qui ont été réalisés dans différentes régions du monde. On notera que l'Europe est plutôt vertueuse et volontaire.

La ***Figure 2*** montre les émissions de CO_2 (en grammes par kilomètre) de chacun des véhicules commercialisés au cours de l'année 2010 en Europe. Elle met en évidence

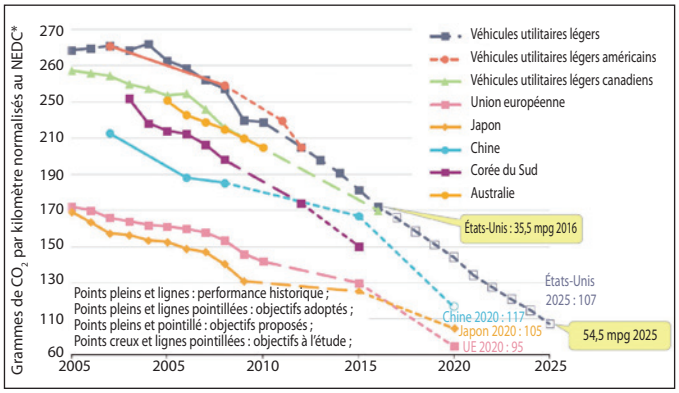


Figure 1

La baisse des émissions de CO_2 par les voitures dans le monde.

** NEDC (New European Driving Cycle) : nouveau cycle européen de conduite. C'est un cycle de conduite automobile conçu pour imiter de façon reproductible les conditions rencontrées sur les routes européennes.*

Source : http://www.nhtsa.gov/staticfiles/rulemaking/pdf/cafe/Oct2010_Summary_Report.pdf

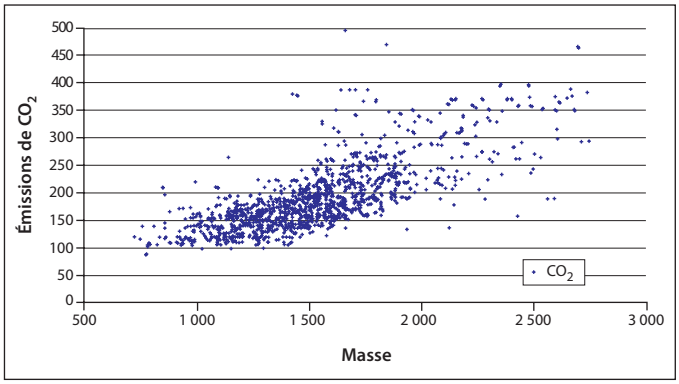


Figure 2

Émissions de CO_2 (en gramme par kilomètre) des voitures commercialisées en Europe en 2010 en fonction de leur masse.

une forte dépendance entre les émissions de CO_2 et la masse du véhicule.

Sur la ***Figure 3***, on a indiqué la moyenne des émissions obtenue en pondérant les émissions de CO_2 de chacun des véhicules par son volume de vente en 2010 : on obtient une valeur de 140,9 g de CO_2 par kilomètre parcouru. En Europe, l'objectif – qui pourrait se transformer en réglementation contraignante – est de 95 g de CO_2 à l'horizon 2020, soit une réduction de 33 % des émissions, c'est-à-dire une réduction équivalente de la consommation de carburant, ce qui correspond à une amélioration de plus de 50 % du rendement. C'est donc un effort considérable qui est demandé à l'industrie automobile en un temps très réduit.

Pour y parvenir, on devra agir sur sept leviers.

Le premier levier est la diminution de la masse des véhicules (***Figure 4***). Il s'agit aussi de mieux utiliser l'énergie fossile, donc utiliser moins de carburant pour parcourir la même distance.

Le deuxième levier, c'est l'amélioration de l'aérodynamique du véhicule, le troisième la réduction des frottements et le quatrième l'amélioration du rendement du moteur thermique. Le

Figure 3

Émissions de CO_2 des voitures en Europe : moyenne et objectif. Objectif réalisé en 2010 : 140,9 g/km ; objectif 2020 : 95 g/km, soit + 51 % de rendement en dix ans.

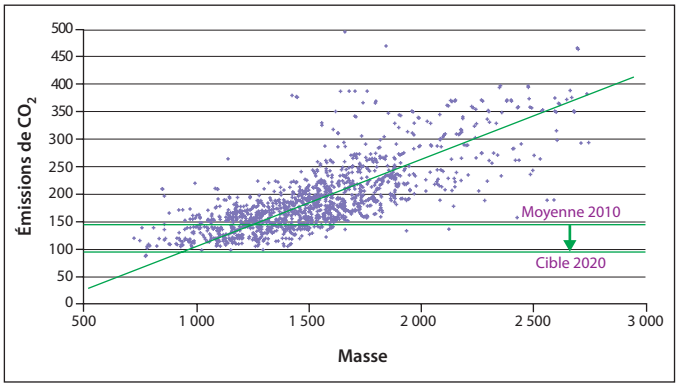
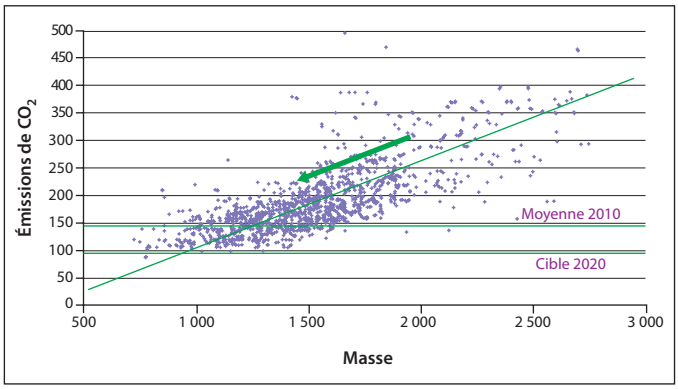


Figure 4

Réduction des émissions de CO_2 par réduction de la masse.



cinquième c'est de n'utiliser ce dernier que lorsqu'il est nécessaire ; retenons qu'il a fallu attendre un siècle pour mettre en œuvre cette idée simple, qui est d'arrêter le moteur thermique dès que le véhicule ne roule plus. C'est le système Stop/Start qui a été commercialisé pour la première fois en 2003. Le sixième levier, très prometteur, est de récupérer de l'énergie cinétique du véhicule pendant les phases de freinage pour la réutiliser ensuite, c'est qu'on appelle l'hybridation (***Figure 5***).

Enfin, le septième levier consiste à utiliser une source d'énergie non fossile pour certains usages ; cela permettrait d'annuler les émissions de CO_2 pendant ces usages (***Figure 6***).

Parmi les sept leviers de réduction des émissions, quatre d'entre eux font depuis plusieurs dizaines d'années l'objet d'optimisations constantes de la part de l'industrie automobile, à savoir :

– réduction de la masse ;

– amélioration de l'aérodynamique ;

– réduction des frottements ;

– amélioration du rendement du moteur thermique.

Trois sont plus nouveaux :

– utilisation de l'énergie non fossile ;

– arrêt du moteur thermique dès que possible ;

– récupération d'énergie.

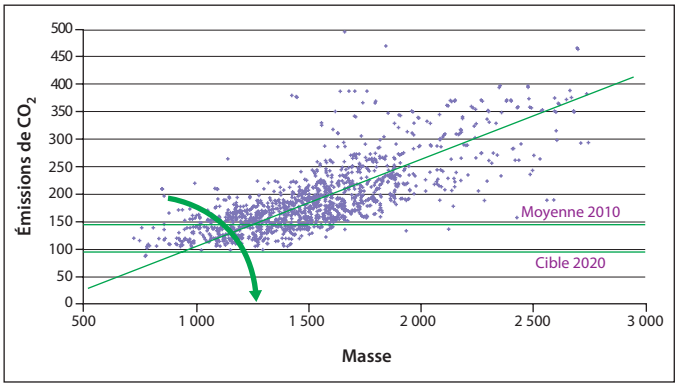


Figure 5

Réduction des émissions de CO_2 par une meilleure utilisation de l'énergie (amélioration de l'aérodynamique, réduction des frottements, amélioration du rendement du moteur thermique, arrêt du moteur thermique dès que possible, récupération d'énergie). L'accroissement du rendement correspond à une diminution de la pente de la droite moyenne.

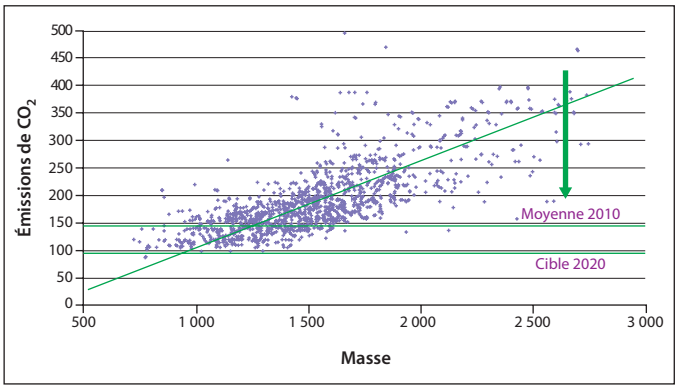


Figure 6

Réduction des émissions de CO_2 par l'utilisation d'énergie non fossile.

Le recours à un ou plusieurs moteurs électriques dans la chaîne cinématique du véhicule (c'est qu'on appellera l'électrification du véhicule dans la suite de ce chapitre) permet d'actionner ces trois leviers. Seule l'électrification permet d'actionner les trois leviers à la fois.

3 Mise en œuvre de l'électrification

L'électrification n'est pas un rêve mais c'est déjà une réalité puisqu'on trouve des véhicules électrifiés disponibles sur le marché. On notera même que ces véhicules mettent en œuvre une grande diversité de solutions. Un consensus existe pour regrouper les véhicules électrifiés en six grandes familles ainsi qu'indiqué sur la ***Figure 7***. Les véhicules appartenant à une même famille sont très différents, ils n'ont pas la même architecture, n'utilisent pas les mêmes types de moteur, de tension d'alimentation, de technologie de batterie, de capacité de stockage d'énergie, etc. Nous sommes encore loin d'un consensus technique par famille.

On notera que plus on va vers la droite de la ***Figure 8***, plus le niveau d'électrification est important. Retenons deux règles simples :

1 - plus on va vers la droite de la figure, plus la part d'énergie électrique est grande ; pour les trois familles de la

Figure 7

L'électrification : les six grandes familles.

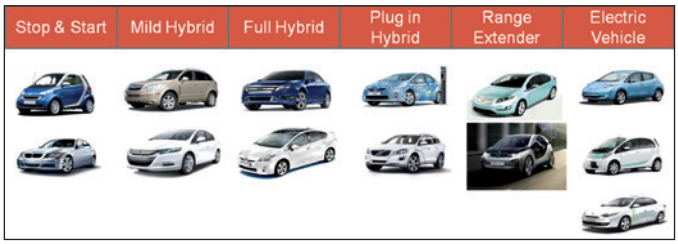


Figure 8

Les caractéristiques des six familles.

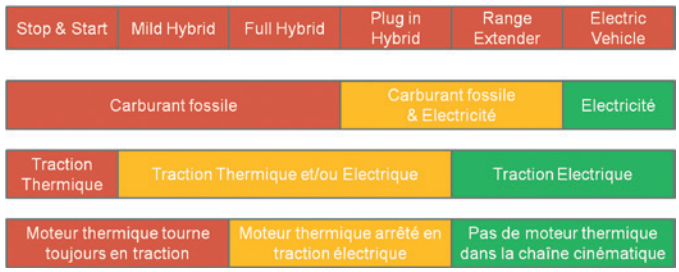
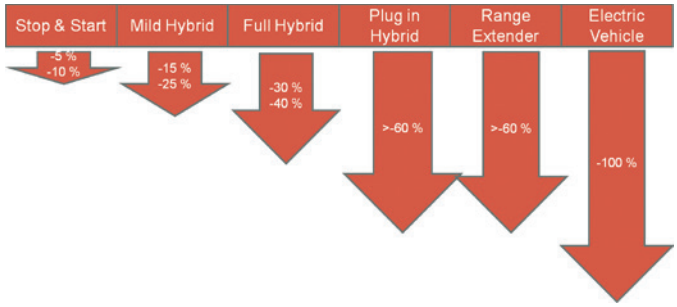


Figure 9

Diminution des émissions de CO_2 pour chacune des six familles.



gauche de la figure, la seule source d'énergie est le carburant fossile, alors que pour celle la plus à droite, elle est seulement électrique ; pour les deux familles intermédiaires, le véhicule fonctionne en électrique en usage urbain et redevient thermique hors des villes ;

2 - plus on va vers la droite de la figure, plus la puissance du moteur électrique augmente, plus il participe à la traction et plus fréquemment le moteur thermique est arrêté. On ne retrouve pas de moteur thermique dans les véhicules de la famille la plus à droite, alors que pour les véhicules de la famille la plus à gauche, la traction est assurée exclusivement par le moteur thermique, le moteur électrique, souvent un simple démarreur, ne servant qu'à démarrer le moteur thermique.

On peut associer à chacune des six familles de véhicules un potentiel de gain de réduction des émissions de CO_2 comparé à celles d'un véhicule thermique de performances équivalentes. Les valeurs données dans la ***Figure 9*** correspondent aux valeurs généralement admises dans l'industrie automobile. Ce potentiel de gain va de 5 % à 10 % pour le Stop/Start jusqu'à 100 % pour le véhicule électrique à batterie.

La réduction des émissions de CO_2 est une préoccupation constante de l'industrie automobile depuis déjà de nombreuses années qui se poursuivra encore. Illustrons cela avec deux exemples pris sur les deux extrémités du marché automobile.

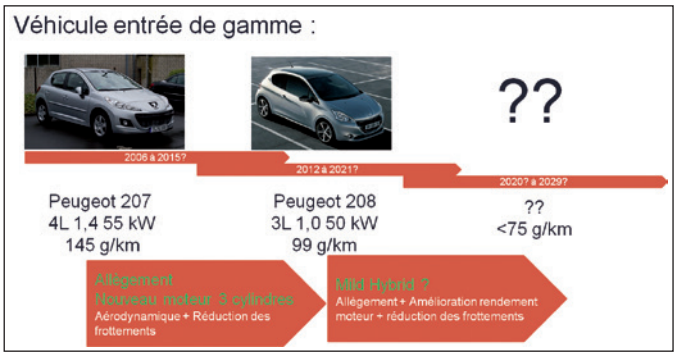
Sur le segment B, celui des véhicules urbains, la Peugeot 208 (***Figure 10***) succède à la Peugeot 207 qui, avec le même niveau de performances et d'habitabilité, émet 99 g de CO_2 par km, à comparer aux 145 g/km de la 207 équivalente. Ce gain est principalement lié à deux facteurs :

– la baisse de la masse, la 208 est 110 kilos plus légère que la 207 (soit près de 10 %) ;

– l'adoption d'un nouveau moteur à trois cylindres à la place du moteur quatre cylindres dont le rendement a été amélioré.

Le futur véhicule d'entrée de gamme qui remplacera peut-être la 208 à l'horizon 2020 devra émettre beaucoup moins que les 95 g/km de l'objectif 2020 – certainement moins de 75 g/km. Comment obtenir un gain supplémentaire d'au moins 20 g/km ? Une solution possible est de combiner l'adoption d'une hybridation du type « Mild Hybrid » (voir la ***Figure 8***), associée à la poursuite des efforts sur l'allégement, l'amélioration des rendements et la réduction des frottements.

L'évolution des véhicules haut de gamme, du segment E (***Figure 11***), suit le même chemin de réduction, comme le montre l'exemple du haut de gamme de la série 5 de BMW. Le véhicule actuel est



déjà « downsizé » et électrifié, ainsi le moteur V8 de 5 litres du modèle précédent a été remplacé par un moteur six cylindres de trois litres suralimenté assisté par un moteur électrique ; le véhicule appartient maintenant à la famille « full hybrid » avec à la clé un gain d'environ 40 % en émission de CO_2.

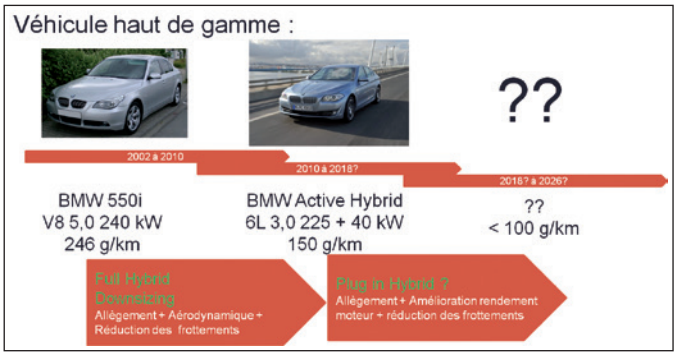
Il est fort à parier qu'afin d'atteindre l'objectif 2020, les émissions de CO_2 du véhicule remplaçant devront être inférieures à 100 g/km. Le recours à un moteur électrique plus puissant et l'usage de l'énergie électrique en ville permettront de faire passer les émissions de CO_2 de ce véhicule sous la barre des 100 g/km ; il appartiendrait alors à la famille des « Plug in Hybrid », il présenterait en plus l'avantage d'émissions

Figure 10

Évolution de la Peugeot 207.

Figure 11

Évolution de la BMW 550i.



nulles en villes, ce qui le rendrait « acceptable » d'un point de vue sociétal.

Bien entendu, ces deux exemples ne sont là qu'à titre purement indicatif et ne reflètent en rien ce que les constructeurs préparent pour leurs futurs modèles. Néanmoins, ils permettent d'appréhender le fait qu'abaisser les émissions moyennes de CO_2 des véhicules vendus en 2020 à 95 g/km est techniquement possible. Toutefois, l'atteinte de cet objectif reste économiquement problématique. En effet, le recours à des moteurs électriques plus puissants, à des batteries contenant plus d'énergie coûte beaucoup plus cher. À quoi cela servirait-il de concevoir des véhicules préservant mieux l'environnement en émettant moins de CO_2 mais invendables du fait d'un coût de revient trop élevé ? (voir l'***Encart : « L'équation économique et l'avenir de l'électrification »***).

L'industrie automobile ne dispose que de deux à trois ans pour arriver à définir les architectures, et que d'environ quatre à cinq ans pour développer des composants optimisés qui lui permettront d'atteindre l'objectif d'émission de CO_2 de 2020 en respectant l'équation économique. Elle mettra à profit cette période pour simplifier les architectures, faire un juste dimensionnement des composants, développer la technologie de ces composants – soit déployer beaucoup d'efforts de recherche et de développement.

Elle devra à marche forcée introduire de nouvelles technologies en grande série sans mettre en jeu la sécurité des utilisateurs et sans altérer la qualité. On a récemment vu que l'introduction de batterie lithium-ion dans le Boeing « Dreamliner » ne s'était pas faite sans problème. On comprendra dans ce contexte qu'il est important de figer au plus tôt le maximum de paramètres entrant en compte dans l'équation économique et d'aider l'industrie automobile dans son effort de recherche, de développement et d'industrialisation.

Jusqu'où pourra-t-on baisser les émissions de CO_2 ?

Au-delà de 2020, il sera nécessaire de poursuivre l'effort afin de diminuer les émissions, mais à quel rythme ? On parle d'un nouvel objectif à 60 g/km, mais à quel horizon ? 2020 ? 2030 ? Cette baisse est-elle sans limite ? Est-il envisageable de faire tendre les émissions de CO_2 de l'automobile vers zéro ? Nous allons tenter d'apporter des réponses.

Faisons l'hypothèse que l'objectif de 95 g/km d'émission de CO_2 est atteint en 2020 avec un mix entre les familles de véhicules tel que défini dans la ***Figure 12***, pourcentage de gauche dans la case verte, soit par exemple 30 % des véhicules en 2020 font partie de la famille « Stop & Start ». Ce mix correspond à un consensus de l'industrie.

Faisons maintenant l'hypothèse, toute théorique, d'évolution de ce mix vers les chiffres que l'on trouve à droite des cases vertes de la ***Figure 12***. Soit la part des véhicules de la famille « Stop & Start »

L'ÉQUATION ÉCONOMIQUE ET L'AVENIR DE L'ÉLECTRIFICATION

Réduire les émissions de CO_2 coûte cher. On rapporte ce surcoût au gramme de CO_2 dont on a évité l'émission (en euros par gramme de CO_2). Toutes les solutions techniques sont évaluées puis comparées les unes par rapport aux autres. À ce jour, aucun consensus technique ne s'est dégagé mettant en évidence une ou plusieurs solutions meilleures que les autres.

L'équation économique, c'est la comparaison entre ce coût et le prix supplémentaire que l'acheteur est prêt à payer – **le seuil acceptable**. Ce seuil dépend du constructeur, du segment du véhicule. Il est clair qu'on n'accepte pas le même surcoût pour l'achat d'un véhicule à 75 000 € ou d'un véhicule à 7 500 €. Rentrent en ligne de compte dans cette équation des facteurs externes tels que le prix du carburant fossile, difficilement prévisible à horizon 2020, ou le montant d'éventuelles incitations, fortement variable de pays à pays et dans le temps.

On conviendra que, dans ce contexte, la tâche n'est pas aisée pour les constructeurs automobiles qui doivent figer les architectures qui seront retenues pour les véhicules vendus en 2020 d'ici deux à trois ans.

D'autres facteurs, sociétaux par exemple, peuvent rendre l'électrification incontournable, par exemple un jour il pourrait devenir inacceptable de rouler en ville avec un gros 4×4 de luxe autrement qu'en électrique.

Une équation économique résolue est une condition nécessaire pour que la solution s'impose mais elle n'est pas suffisante. En effet, prenons l'exemple du véhicule électrique. Nous avons vu plus haut que le coût de la batterie du véhicule électrique auquel on ajoute le coût de l'énergie sur la vie du véhicule se compare favorablement à celui du coût de l'énergie sur la vie du véhicule thermique. Si on fait l'hypothèse que le coût du véhicule électrique hors batterie est équivalent à celui du véhicule thermique, alors l'équation économique du véhicule électrique est résolue.

Les industriels s'accordent à dire que ces conditions devraient être réunies avant 2020 et que prenant en compte les incitations fiscales existantes en France aujourd'hui, elles sont d'ores et déjà réunies. Pourtant, la part de marché des véhicules électriques aujourd'hui est très loin des 25 % atteignables (voir plus haut). En effet, il convient de prendre en compte l'acceptation par le grand public des contraintes du véhicule électrique, notamment la limitation de l'autonomie. Le temps nécessaire à cette acceptation est difficilement quantifiable. Rappelons-nous qu'il a fallu plus de dix ans pour que la Smart prenne une place significative sur le créneau des citadines et qu'une offre concurrente, la Toyota iQ, soit introduite sur le marché.

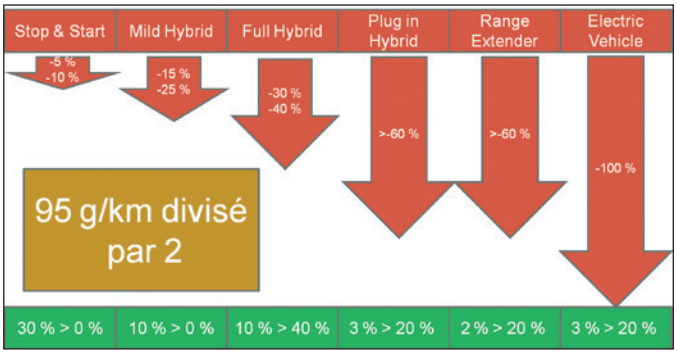


Figure 12

Hypothèse d'évolution à l'horizon 2030-2040.

passe de 30 % à 0 %, ou celle des « Electric Vehicle » passe de 3 % à 20 %. Calculons, de manière purement arithmétique, sans prendre en compte la faisabilité technique ou économique, le gain d'émission de CO_2 associé au changement de famille. Le résultat de ce calcul est que les émissions moyennes de CO_2 seraient divisées par deux, c'est-à-dire bien en dessous des 60 g/km.

Sous quelles conditions ce calcul théorique pourrait-il devenir une réalité ? D'un point de vue technique, nous avons vu que nous n'avons joué que sur le mix entre différentes familles de véhicules qui chacune existe déjà en série. Prenons l'exemple du segment B, l'un des plus compétitifs du marché, celui des citadines comme la Peugeot 208, la Renault Clio ou la Volkswagen Polo, dont les prix publics s'échelonnent entre moins de 10 000 € et jusqu'à 25 000 €, voire plus pour des modèles « premium ». On trouve aujourd'hui disponible sur le marché la Renault ZOE appartenant à la famille « Electric Vehicle » à partir de 13 700 €, prime écologique déduite et hors batterie, ou la Toyota Yaris Hybride appartenant à la famille « Full Hybrid » à partir de 18 500 €, prime écologique déduite. Une offre existe déjà mais elle se situe, en prix de vente, plutôt sur la partie haute du segment et surtout elle bénéficie d'une incitation qui n'a pas vocation à durer. Cet exemple permet de comprendre que l'effort devra porter sur la réduction du coût de l'électrification du véhicule. Les deux postes les plus importants de ce surcoût sont la batterie et l'électronique de puissance.

Les constructeurs concevront plusieurs générations successives de véhicules électrifiés, ils optimiseront les architectures, ils standardiseront les composants, ils les dimensionneront au plus juste, ils feront naître des standards, ils offriront des volumes plus élevés à leur fournisseurs et les mettront en concurrence, ainsi le surcoût de l'électrification baissera.

Ces efforts ne seront pas suffisants ; il faudrait lancer dès maintenant des **efforts importants de recherche** notamment sur l'électronique de puissance et sur les batteries.

En matière d'électronique de puissance, il faudrait particulièrement travailler sur les **commutateurs de puissance**. Ces composants sont assimilables à des interrupteurs que l'on ouvre et ferme plusieurs milliers de fois par seconde et dans lesquels passe un courant. Ces phases de commutations suivies de phases de conduction s'accompagnent de pertes de Joules et donc d'un échauffement qui limite la puissance transmise. Les recherches doivent porter à la fois sur les **matériaux** pour arriver à diminuer les pertes et augmenter les températures de fonctionnement, et sur le **« packaging »** (c'est-à-dire l'arrangement des éléments constitutifs du composant électronique) de manière à évacuer au mieux la chaleur.

Le deuxième grand axe de recherche porte sur le **stockage d'énergie**, ce qu'on appelle les batteries, avec un travail

important à fournir sur de **nouveaux matériaux** associés à de **nouveaux procédés** pour obtenir une baisse de coût, sur une amélioration de la sécurité des batteries ; il faut aussi travailler sur la substitution des matériaux rares et stratégiques par des matériaux plus accessibles.

Deux types d'applications différentes sont concernés : une **batterie à forte puissance massique** pour les véhicules rechargeables des familles « Plug in Hybrid », « Range extender » et « Electric Vehicle », et une **batterie avec un rapport puissance/énergie important** pour les véhicules des familles « Mild Hybrid » et « Full Hybrid », où l'on utilise la batterie pour récupérer l'énergie pendant les phases de freinage.

Peut-on aller encore plus loin ? Atteindre une émission zéro ? L'***Encart « Deux scénarios pour l'avenir »*** se lance dans un peu de prospective.

DEUX SCÉNARIOS POUR L'AVENIR

Nous avons vu plus haut que le véhicule électrique n'était pas une alternative au véhicule conventionnel du fait son autonomie limitée. Contourner le principal handicap du véhicule électrique – la recharge des batteries – a fait foisonner les imaginations. Voici deux scénarios possibles parmi une multitude : dans l'un, le véhicule va **générer de l'électricité pendant qu'il roule** et dans l'autre, il va **capter de l'électricité alors qu'il se déplace**.

Premier scénario

Le véhicule est évidemment à traction électrique, il dispose d'une réserve d'énergie, d'une batterie qui lui donnent quelques dizaines de kilomètres d'autonomie et il dispose aussi d'un **générateur alimenté en carburant non fossile**.

Le générateur recharge la batterie dès que son niveau de charge est trop bas. Il n'y a pas besoin que la puissance de traction et la puissance du générateur soient égales. Le générateur est dimensionné sur le besoin de puissance maximum en régime permanent du véhicule, puissance nécessaire pour rouler sur le plat à 130 km/h si l'on prend un véhicule à usage routier. La puissance de traction est dimensionnée pour atteindre le niveau de performances d'accélération. La batterie est rechargée sur le secteur à chaque fin de trajet. Les petits trajets du quotidien sont parcourus uniquement avec l'énergie contenue dans la batterie. On ne recourt au générateur que pour les grands trajets. La capacité du réservoir de carburant et son remplissage sont compatibles de l'usage que l'on fait aujourd'hui des véhicules conventionnels.

Quel carburant ? L'hydrogène est un vecteur d'énergie répondant à ce cahier des charges, on peut stocker dans un véhicule la quantité nécessaire pour parcourir 600 kilomètres et faire le plein en cinq minutes. Ce carburant peut être obtenu à partir de différentes énergies primaires, il peut être obtenu sans émission de CO_2. Des démonstrateurs existent, plusieurs véhicules roulent à l'hydrogène, plusieurs stations-service permettant de faire le plein d'hydrogène en moins de cinq minutes ont été déployées (voir le ***Chapitre de D. Larcher et F. Darchis***).

La prospective autorisant toutes les audaces, on peut envisager l'installation d'une infrastructure de distribution d'hydrogène peu dense, en dehors des grands centres urbains, où l'on produit sur place à partir d'énergie renouvelables. À noter que la production d'hydrogène peut aussi servir de moyen de stockage d'énergie à grande échelle.

Deuxième scénario : la captation d'énergie en roulant

Le véhicule est toujours à traction électrique, il dispose d'une réserve d'énergie, d'une batterie qui lui donne quelques dizaines de kilomètres d'autonomie et d'un **dispositif de captation d'électricité permettant de recharger la batterie en roulant**. Il recharge la batterie dès que son niveau de charge est trop bas. Les petits trajets du quotidien sont parcourus uniquement avec l'énergie contenue dans la batterie. On ne recourt au dispositif de captation que pour les grands trajets, une infrastructure de charge a été déployée sur les chaussées d'autoroutes, voies express et rocades (les 12 000 km de réseau français présentés dans le ***Chapitre d'H. Van Damme***).

Comment capter de l'électricité en roulant ? Des bornes de recharge sans contact pour véhicules électriques existent déjà, elles assurent la charge de la batterie à l'arrêt. Des démonstrateurs de pistes avec recharges sans contact de véhicules en mouvement existent aussi, une ligne de bus électrique se rechargeant sans contact à l'arrêt et en roulant sur les premières dizaines de mètres après l'arrêt sera bientôt mise en service en Allemagne.

Ces deux scénarios – bien entendu très « prospectifs » – permettent chacun de rendre un véhicule à traction électrique polyvalent, c'est-à-dire compatible de l'usage que l'on fait aujourd'hui des véhicules conventionnels, et sans émission de CO_2, tout au moins du réservoir à la roue.

Quel avenir pour le véhicule électrique ?

Aujourd'hui, le véhicule électrique n'est pas une alternative au véhicule thermique. Il a son propre marché, qui est important, ce qui justifie d'ailleurs que des industriels investissent dans ce créneau.

Deuxièmement, **l'électrification est la seule voie qui permette de baisser durablement les émissions de CO_2**, d'atteindre les objectifs de 2020, de continuer à les faire baisser au-delà, voire les faire tendre vers zéro. Le défi porte sur la baisse du surcoût lié à l'électrification.

Enfin, de très importants **efforts de recherches** – notamment dans les domaines de **l'électronique de puissance et des batteries** – sont à déployer pour rendre l'équation économique de l'électrification possible. Dans les deux cas, l'invention et le développement de nouveaux matériaux sont des verrous clés.