

La propulsion thermique n'a pas dit son dernier mot : Le point de vue d'un équipementier

A l'heure où un certain « désamour » pour l'automobile fait souvent les gros titres des journaux, il peut paraître un rien désuet de continuer à évoquer les progrès que l'on est fondé à attendre, en matière de véhicules à propulsion thermique. Pourtant, ni les embouteillages, ni les radars, ni les taxes, ni les diverses campagnes anti-automobiles n'ont réussi à tuer l'émotion : le débat reste vif, autour de la voiture, qui est, à l'évidence, tout ce que l'on voudra, sauf un produit banal.

par **Guillaume DEVAUCHELLE***

Il s'agit, bien sûr, d'un débat politique, au niveau de la Communauté européenne (qui a la haute main sur la réglementation en matière d'émissions de CO₂), du Président de la République (qui a marqué les esprits en créant un nouveau vocable : « décarboné »), voire de conseils de quartiers (qui s'expriment volontiers sur le plan de circulation « zone 30 » instaurant une limitation de vitesse à 30 km/h ou sur l'installation d'un nouveau rond-point, juste en face de chez vous). Nul doute que les décisions prises à chaque niveau, tant en termes de réglementation que de fiscalité, auront un impact sur l'évolution des motorisations.

Mais ce débat mobilise aussi les experts : les géo-politologues, les démographes, les sociologues sont à l'affût des conséquences de l'urbanisation croissante, de la globalisation, de l'évolution des usages. Les géologues et

les économistes s'interrogent, de leur côté, sur le *peak oil* et sur le cours du baril de pétrole. Les « marketeurs » sondent les chiffres et les cœurs, afin de définir les tendances à venir du marché automobile. Les chercheurs et les ingénieurs ne sont pas en reste : ils planchent sur les technologies du futur, améliorant les produits actuels ou explorant des voies « nouvelles ». C'est là que la Fée Electricité effectue son grand retour, cent dix ans après le record battu par la « Jamais Contente ».

Enfin, Monsieur et Madame Tout-le-monde, forts de leur expérience personnelle, ont leurs idées bien arrêtées. Pourtant, la notion de progrès automobile diffère sensiblement, selon que l'on habite sur la Butte Montmartre ou que l'on circule, à quatre sur un vélomoteur, dans les rues de Bombay... Signalons, en outre, que des valeurs affirmées haut et fort s'effacent au moment de signer le bon de commande...

L'équipementier – qui n'a, somme toute, qu'une dizaine de clients à travers le monde – paraît bien chanceux

* Directeur « Recherche et développement » du groupe VALEO.

de ne pas avoir à affronter une telle complexité. Les relations *business to business* (B2B), entre professionnels, sont, de prime abord, beaucoup plus sécurisantes.

Deux technologies se partagent aujourd'hui l'essentiel du marché : l'injection directe « diesel » et l'injection multipoints « essence » (laquelle est, elle aussi, en train d'évoluer vers l'injection directe). Les autres motorisations sont quantitativement marginales, même si elles sont très présentes dans les médias...

Les progrès à attendre apparaissent simples à formuler : le moteur « diesel », particulièrement sobre en carburant, est cher (son coût est environ deux fois plus élevé qu'un moteur à essence, soit, pour donner un ordre d'idée, autour de 3 000 €), et il est difficile à dépolluer (émissions de particules et d'oxydes d'azote (NOx)). Le moteur « essence », quant à lui, doit essentiellement améliorer sa consommation.

Ce marché s'avère particulièrement stable, ses spécificités régionales, au niveau mondial, perdurant pendant des décennies :

- La cylindrée moyenne des moteurs vendus actuellement varie du simple (1,8 l), en Europe, au double (3,7 l), en Amérique du Nord ! (Que l'on sache, les lois de la mécanique sont pourtant les mêmes pour tout le monde !)
- l'importance du « diesel », en Europe (où il équipe un véhicule sur deux), nous fait souvent oublier que les motorisations « essence » occupent les trois quarts du marché mondial ;
- le même constat vaut, par ailleurs, pour les modes de transmission.

Nous avons là toutes les caractéristiques d'un marché de masse (800 millions de véhicules en état de marche) et mature.

Mais cette stabilité n'est qu'apparente : citons la feuille de route de l'EUCAR (*European Council for Automotive R&D*), qui fait la synthèse de ce que prévoient les experts européens ès automobile : le marché sera réparti entre huit technologies majeures en 2030, au lieu de deux aujourd'hui, comme indiqué précédemment. Mon interprétation est que nous sommes, en fait, arrivés à un point d'inflexion, qu'il n'y a pas de consensus et que nul ne peut départager de manière définitive les voies technologiques en compétition : nous voici revenus à la glorieuse incertitude du temps des pionniers ! Il suffit de franchir les portes du bureau d'études d'un constructeur automobile pour comprendre, que ce qui est vrai ici, ne l'est pas ailleurs, voire que plusieurs voies peuvent coexister au sein d'une même maison.

L'équipementier est donc conduit à faire ses propres choix. Les démonstrations implacables – et même incontestables, à moyen terme – « du puits à la roue », sur « l'empreinte carbone » ou sur « l'urbanisation des mégapoles », ne sont pas d'une grande aide, quand il s'agit de prendre une décision opérationnelle d'investissement. La durée de développement des technologies s'accommode assez mal des fluctuations conjoncturelles. L'évolution d'un seul facteur (comme le cours du

pétrole, ou la date d'entrée en vigueur d'une nouvelle réglementation) peut déjà modifier radicalement le marché potentiel d'un équipement visant à réduire la consommation de carburant. Et les paramètres à prendre en compte sont multiples, instables et souvent interdépendants (critères d'usage et d'économie par exemple).

FACE À UNE TELLE COMPLEXITÉ : QUELLE ATTITUDE ADOPTER ?

Rassurez-vous, nous ne développerons pas ici de méthodes sophistiquées de résolution de problème ; nous voulons simplement partager avec vous six réflexions faisant appel au simple bon sens...

Les arbres ne grimpent pas au ciel !

Depuis l'après-guerre, les progrès réalisés en matière de motorisation ont permis, simultanément, d'améliorer les performances dynamiques des véhicules (accélération, vitesse de pointe), de compenser l'augmentation de leur poids (liée à l'accroissement de la sécurité et du confort), et cela, tout en diminuant drastiquement les émissions polluantes, et en contenant la consommation de carburant, ce qui peut se résumer par trois chiffres :

- + 120 % de puissance ;
- + 40 % d'accélération ;
- – 40 % de consommation en 30 ans.

A contrario, a été constaté un doublement du prix moyen d'un véhicule sur les vingt dernières années, alors que, dans le même temps, le revenu moyen des ménages n'augmentait que de 50 %.

Cette logique du « toujours plus » a atteint ses limites : pourquoi une telle puissance des moteurs, dans un contexte urbain saturé, ou sur des autoroutes où la vitesse est limitée ? L'utilité de certaines fonctions nouvelles est controversée, et les équipements de sécurité eux-mêmes semblent avoir atteint une asymptote. La polyvalence actuelle des véhicules, qui sont utilisés pour l'essentiel en ville, mais qui sont dimensionnés pour être capables de conduire toute la famille en vacances, ne fait plus recette. Les priorités changent, la recherche de la performance cède le pas à la nécessité, toujours plus pressante, de réduire les émissions de CO₂, et donc la consommation de carburant, afin de lutter contre le réchauffement climatique. Mais quelle valeur retenir : 30, 60 ou 100g CO₂/km ? Et à quel horizon ? Le marché accepterait-il durablement une régression des performances des véhicules ? Aucun précédent historique n'en atteste...

A cet égard, de même que le vélo électrique chinois me paraît être beaucoup plus un « super-vélo » qu'une « sous-moto » écologique, la voiture « Nano » du constructeur indien Tata doit être évaluée à l'aune du

progrès réel qu'elle apporte, par rapport aux motos indiennes.

Une rupture technologique mènerait à un paradigme nouveau, qui ne constituerait pas nécessairement une régression. J'y vois une des raisons essentielles de l'engouement actuel pour le véhicule électrique. Mais les millions d'heures d'études et les années de retour d'expérience nécessaires ont placé la barre très haut, pour les solutions alternatives.

Un athlète sous-employé : le moteur thermique

Les progrès réalisés dans la propulsion thermique ont abouti à des moteurs surpuissants par rapport à leur utilisation réelle.

Pour offrir, pendant quelques courts instants, une accélération (couple) et une vitesse maximale (puissance) élevées, le moteur fonctionne très en-deçà de ses plages optimales, la très grande majorité du temps. Pour rouler en ville, ou pour rouler à 130 km/h sur autoroute, quelques dizaines de KW suffisent : il est inutile d'être plus précis et d'entrer dans les polémiques relatives aux cycles dits « représentatifs », compte tenu de la diversité réelle des usages.

Nombreuses sont les possibilités technologiques, qui permettent de tendre vers un meilleur compromis :

- réduire la cylindrée du moteur (*downsizing*) et l'équiper d'un turbo ou d'un compresseur, afin de conserver la performance ;
- déconnecter certains cylindres ;
- recycler les gaz d'échappement ;
- modifier dynamiquement les paramètres d'injection, (etc.)

Tout cela procède du même esprit.

Toutefois, l'énergie produite par le véhicule en décélération est perdue, pour l'essentiel. Parmi les différentes voies possibles (pneumatique, mécanique, électrique...) de récupération de cette énergie cinétique, la voie électrique est techniquement la plus avancée.

Les motorisations hybrides présentent le double intérêt d'offrir cette fonction de récupération d'énergie, tout en ramenant le moteur thermique à des conditions de fonctionnement plus favorables : selon les conditions d'utilisation du véhicule, l'apport d'un couple de traction supplémentaire (ou, au contraire, l'opposition d'un couple électrique, pour recharger les batteries) permet de maintenir le moteur thermique à l'intérieur de sa plage de rendement optimum.

10 €/kg, tout compris

Quelles que soient les voies considérées, il faut ajouter des équipements supplémentaires, et/ou sophistiquer davantage encore les équipements existants : bonne nouvelle, pour les équipementiers !

Il convient néanmoins de garder en mémoire un chiffre, quand bien même il serait simplifié à l'extrême : un véhicule de grande diffusion, pesant environ une tonne, se vend approximativement 10 000 €, soit 10 € le kilo ! Inutile de chercher un tel ratio chez son tailleur ou au rayon multimédia... Pour les équipementiers, cela se traduit par un prix de vente moyen de l'ordre de 5 à 6 €/kg. Pourtant, le tissu des sièges résiste à plus de dix ans d'usage intensif ; l'électronique embarquée n'a rien à envier, en termes de performances ou de fiabilité, aux autres secteurs de l'industrie. Il en va de même pour les aciers, le vitrage, les enjoliveurs et ... la motorisation. L'argument du « coût de possession », qui consiste à comparer l'investissement initial avec des économies de consommation à venir, reste assez théorique, pour le grand public. Ainsi, à performances comparables, un moteur « diesel » se vend plusieurs milliers d'euros plus cher que son homologue « essence », même s'il est très difficile d'amortir la différence de prix sur la consommation de carburant. L'image de marque se bâtit dans la durée. Le prix de vente global du véhicule évoluera peu, quel qu'en soit le contenu technique. Pour chaque équipement nouveau, il faudra trouver les économies correspondantes. La conception à coût objectif est un *must*, en matière d'équipement automobile. La tendance est donc à l'intégration, grâce à des pièces multifonctions et à la mécatronique (la fusion de la mécanique et de l'électronique, dans un même organe). Une fonction nouvelle ajoutée à un véhicule, si elle induit à l'origine l'adjonction de pièces supplémentaires, doit tôt ou tard s'intégrer dans un ensemble plus vaste. Laissant derrière lui l'ère du système, l'équipementier doit composer, aujourd'hui, avec les systèmes de systèmes. Les fonctions liées à la motorisation se coupleront inéluctablement aux fonctions « châssis ».

Pas de compromis sur la qualité

« Plus complexe » ne doit pas signifier « moins fiable ». Une panne de moteur, ou même un simple dysfonctionnement, se vit comme une expérience traumatisante. La recherche de la performance ne peut pas se faire au détriment de la qualité (au plein sens du terme : fiabilité, disponibilité, etc.). Le critère de la nouveauté n'est en aucun cas une excuse, bien au contraire, et cela vaut pour toute la filière (sans oublier l'après-vente). Le cas du GPL montre que quelques accidents peuvent tuer la diffusion d'une technologie ou, au minimum, la ralentir sérieusement. On tolère une couverture de réseau incomplète, pour un téléphone portable, mais pas un moteur qui tousse...

Pour l'équipementier, la qualité se mesure en quelques « ppm » (parties par million) et les « retours garantie » en millions d'euros. Un moteur vingt-quatre soupapes n'est pas moins fiable qu'un moteur douze soupapes, ce qui veut dire que la fiabilité intrinsèque du composant

est extrême. Ce résultat est acquis, bien sûr, grâce à des procédures de conception, de modélisation et de validation très rigoureuses, mais aussi, il faut bien le reconnaître, grâce au retour d'expérience.

Une nouvelle technologie introduit toujours un risque, intrinsèquement, de par son interaction avec l'environnement, et aussi, bien évidemment, en raison de l'absence d'historique. Le caractère intrusif d'une innovation est d'ailleurs rarement correctement évalué, car une telle évaluation se limite aux aspects techniques, en négligeant, le plus souvent, les impacts organisationnels et les changements de *process* indispensables.

LA « FÉE ÉLECTRICITÉ » : UN INFATIGABLE MOTEUR DE L'ÉVOLUTION

Les médias présentent souvent le véhicule électrique comme une solution entièrement nouvelle, par opposition au véhicule thermique. La vraie rupture est moins dans la technologie, que dans un usage combinant simplicité de conduite, absence de bruit et de pollutions locales, mais aussi apparition de nouvelles contraintes d'autonomie, de temps de recharge ou de nouvelles infrastructures.

En effet, l'électrification concerne déjà la quasi-totalité des organes des véhicules. A y regarder de plus près, le groupe motopropulseur (plus exactement, la fonction « traction ») est parmi les derniers éléments à s'électrifier, dans l'univers automobile. L'électrification des fonctions est une tendance lourde et continue, qui gagne progressivement. Le véhicule entièrement électrique s'inscrit comme un point extrême de ce *continuum* technologique.

Prenons l'exemple de la direction : d'abord manuelle, elle est actionnée mécaniquement par la seule force des bras du conducteur. Puis elle devient assistée hydrauliquement : quel confort ! Mais c'est au prix d'une pompe, qui fonctionne en permanence et consomme inutilement de l'énergie. Viennent alors les directions électro-hydrauliques (dont la pompe ne fonctionne qu'en cas de besoin), puis, très vite, les directions à motorisation purement électrique. Tôt au tard, les directions seront « *by wire* » (c'est-à-dire à commande purement électrique, sans aucun lien mécanique), comme le sont, aujourd'hui, les commandes de vol des avions. Les fonctions offertes alors peuvent être beaucoup plus évoluées, grâce au couplage entre systèmes évoqué précédemment : dans le cas considéré de la direction, il peut s'agir du contrôle de trajectoire, en situation d'urgence ou lors de certaines manœuvres. Il ne s'agit pas d'une substitution pure et simple d'une source d'énergie par une autre, mais bien d'une évolution fonctionnelle forte. Ainsi, dans le domaine de la motorisation, il est impossible, aujourd'hui, de répondre aux normes anti-pollution en vigueur, en l'absence d'un contrôle électronique sophistiqué.

Cette évolution ne concerne pas seulement les accessoires du moteur (comme le ventilateur), elle concerne aussi les fonctions essentielles : la commande d'accélérateur électrique, *by wire*, a déjà remplacé le bon vieux câble en acier, sur votre voiture. Elle se veut discrète, car les mentalités progressent moins vite que la technologie. La commande électronique des moteurs, révolution des années 1990, bien que maintenant universellement répandue, n'a toujours pas bonne presse. Le grand public a oublié les progrès induits, considérables sur bien des plans (performance, disponibilité, maintenance, etc.), alors que les problèmes de qualité des débuts ont laissé des traces encore bien présentes.

Le véhicule électrique jouit, quant à lui, d'une réputation de simplicité et de solidité : peu importe que sa simplicité apparente soit sous-tendue par une électronique complexe. Reste un beau challenge pour les batteries : l'énergie massique, stockée sous forme liquide, est au minimum 50 fois plus dense qu'avec les meilleures batteries, et, de plus, elle se recharge cinq cents fois plus vite.

LES MOTORISATIONS HYBRIDES (OU LA THÉORIE DE L'ÉVOLUTION)

Par définition, les hybrides se présentent comme des mélanges des caractéristiques des véhicules thermiques et électriques.

Les architectures possibles ne manquent pas :

- « micro-hybride » : le moteur thermique se coupe, lors de l'immobilisation du véhicule ;
- « hybridation douce » : pas de traction purement électrique ; le moteur électrique offre un appoint de couple, et il récupère l'énergie de décélération du véhicule, pour recharger les batteries ;
- « hybride » : le roulage peut être, dans certaines conditions, purement électrique, mais toute l'énergie provient du moteur thermique ;
- « hybride rechargeable » : l'énergie vient préférentiellement du réseau électrique, l'énergie fossile étant utilisée pour étendre l'autonomie du véhicule, en cas de besoin...

Pour chaque architecture, plusieurs solutions techniques sont en compétition :

- plusieurs implantations de la machine électrique sont envisageables (sur le pont arrière, entre le moteur et la boîte de vitesses, sur la face avant, dans les roues...) ;
- différentes structures électrotechniques des machines et commandes associées sont possibles ;
- les tensions électriques envisagées peuvent aller de 12 Volts jusqu'à 1 200 Volts...

Les différentes options offrent un choix presque infini, chacune ayant ses avantages et ses inconvénients. Je ne résiste pas au plaisir de citer ce que dit l'encyclopédie *online* Wikipédia à propos de l'hybridation, dans le domaine des sciences du vivant :



© Didier Maillac/REA

Voiture équipée d'un système micro-hybride : le moteur thermique se coupe, lors de l'immobilisation du véhicule.

« [...] l'hybridation entraîne une combinaison de multiples mutations, qui, si elles sont bénéfiques et stables, peuvent, en une cinquantaine de générations, faire naître une nouvelle espèce. »

Gageons que l'Automobile fera le tri en moins de cinquante générations, et que très peu des architectures d'hybrides actuellement proposées auront une descendance pérenne. Choisir l'une ou l'autre de ces architectures est donc affaire de conviction. Au lieu de les opposer, il est sans doute plus utile d'en rechercher les dénominateurs communs.

Derrière leurs différences, les véhicules thermiques, hybrides ou électriques s'appuient, en effet, sur les mêmes technologies de base (ou « briques technologiques »). Un équipementier automobile, qui est avant tout un fournisseur de technologies (*techno-provider*), se doit impérativement de les maîtriser, et d'être assez agile pour les appliquer aux différentes architectures possibles.

Au-delà des technologies, un cœur de métier exigeant

On remarquera, tout d'abord, qu'en ce qui concerne les motorisations thermiques, les différences entre « diesel » et « essence » (avec une régulation s'effectuant, respectivement, sur le carburant et sur l'injection d'air) ont tendance à s'amoin- drir, les technologies per-

mettant de piloter simultanément les deux paramètres tout en s'affranchissant progressivement des contraintes de base. Ainsi, le recyclage des gaz d'échappement permet, par exemple, de diminuer la quantité d'oxygène admis, pour un même volume de gaz aspiré.

Toutes les solutions évoquées précédemment font appel à :

- l'électronique de puissance (de quelques kW à quelques dizaines de kW) ;
- l'intégration mécatronique (éléments électroniques indissociables de la mécanique) ;
- des actionneurs divers (vannes, pompes, petits moteurs) pour les asservissements ;
- la nécessité de fonctionner dans un volume réduit et dans un environnement très chaud, ce qui crée des contraintes très sévères ;
- la maîtrise du système, de sa sûreté de fonctionnement, de sa modélisation
- des logiciels (beaucoup !) ;
- l'électrotechnique de pointe (injustement méprisée, il y a peu encore).

Tout cela n'est pas propre à l'automobile, me direz-vous. Comparons, sur un même schéma (voir la figure 1), les exigences des domaines automobile, aéronautique, ferroviaire et de l'électronique portable grand public. Retenons six critères :

- le prix à la pièce (de quelques centimes à quelques milliers d'euros) ;
- le volume de production (de quelques pièces à quelques millions) ;

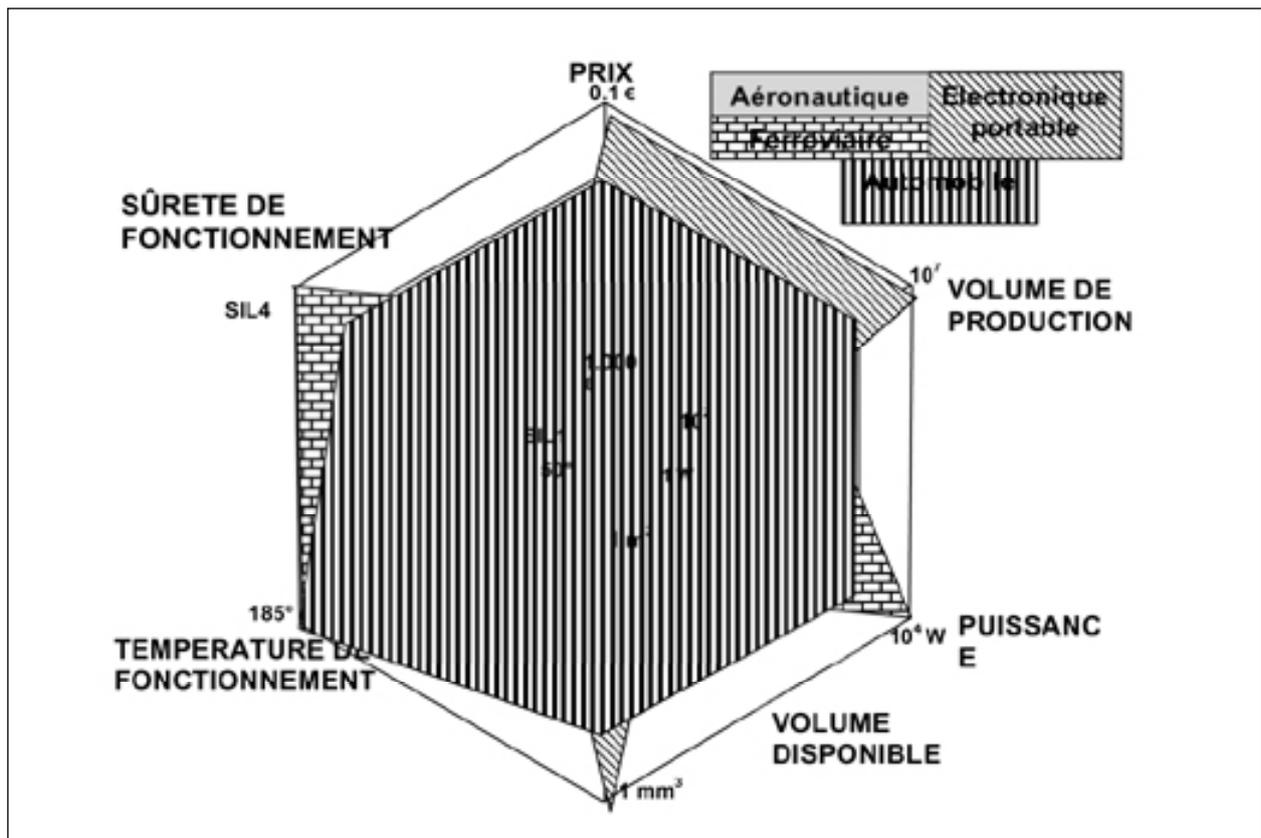


Figure 1 : Analyse multifactorielle (coût, volume de production, puissance, température de fonctionnement, volume disponible et fiabilité,) de quatre grands secteurs industriels : aéronautique, chemin de fer, automobile et électronique portable grand public.

- la puissance électrique (de moins d'un Watt à quelques kW) ;
- le volume disponible (du m³ au mm³) ;
- la température de fonctionnement (de la température ambiante jusqu'à 185°C) ;
- la sûreté de fonctionnement (selon les normes allant de SIL1 à SIL4).

Si l'Automobile n'est pas le secteur le plus exigeant pour chaque paramètre, un coup d'œil sur le diagramme de la figure 1 permet de se rendre compte que l'étendue des contraintes est, quant à elle, unique.

Le développement de solutions répondant à ce niveau de performances, de manière parfaitement répétable et à coût objectif, représente un réel défi scientifique et technique, car il exige de maîtriser simultanément des disciplines aujourd'hui largement distinctes (simulations « multi-physiques », intégration de l'électronique et de la mécanique, ingénierie système...).

CONCLUSION

Notre bel athlète, le moteur thermique, épaulé par la Fée Electricité, a devant lui une marge de progrès considérable, que l'on peut estimer être d'un facteur 2.

Les équipementiers sont en première ligne de la compétition.

Dans cette course de fond, l'objectif d'un facteur 4 (consistant à émettre 4 fois moins de CO₂ par km parcouru) ne pourra être atteint qu'en associant technologie et usage.

La voiture décarbonée de demain fera travailler, ensemble, mécaniciens, électriciens et spécialistes en sciences humaines : le débat ne fait que commencer...