

séance du lundi 17 mai 1999

L'AUTOMOBILE DE DEMAIN: MYTHES ET REALITES

François de Charentenay

En un siècle, l'automobile est entrée dans notre univers. Objet de la vie quotidienne, la place qu'elle occupe est pourtant très originale, à un carrefour entre le monde de la complexité technologique de haut niveau et celui du marché des biens de consommation, avec un impact considérable sur la société et notre comportement social. Le devenir de l'automobile dans les prochaines années est donc un sujet de réflexion particulièrement intéressant pour votre assemblée.

A l'approche de l'an 2000, plus de 500 millions d'automobiles circulent dans le monde, 32 millions en France. Les usines des constructeurs en produisent près de 40 millions chaque année. Le monde du XX^e siècle a été profondément influencé par le développement de la mobilité par l'automobile, comme le XIX^e l'avait été par le chemin de fer. Le développement économique et industriel et la croissance de la mobilité des biens et des personnes sont indissociables, le premier apportant à la deuxième les techniques nécessaires, la deuxième nourrissant le premier en favorisant les échanges de toute nature.

L'automobile, moyen autonome et immédiatement disponible, nous transporte de notre domicile à notre lieu de travail, nous permet en peu de temps de rencontrer nos relations, de nous rendre sur des lieux de vacances et de loisirs, favorise les échanges commerciaux... L'automobile, par son caractère individuel et autonome, a ouvert un nouveau champ d'exercice de notre liberté. En cette fin de XX^e siècle, l'automobile est un objet qui fait partie de notre vie quotidienne au même titre que notre alimentation, notre habitation, nos vêtements. Comme ces derniers, l'automobile a dépassé son rôle uniquement fonctionnel. Ce n'est pas seulement un moyen de transport, c'est aussi un symbole porteur de notre identité mais aussi de notre inconscient. Dynamisme, puissance, sportivité, séduction... sont quelques-uns des caractères que nous pouvons exprimer par la possession d'une voiture, dans laquelle nous avons placé un véritable investissement affectif. Les années 1980 ont été celles d'un hédonisme un peu sauvage exprimé par exemple par l'engouement pour les « GTI ». Les années 1990 ont montré plutôt une tendance au repli sur soi, le terrier et le cocon, le besoin de sécurité à l'image de l'air-bag ou sac gonflable. A la veille d'un nouveau siècle, on redécouvre le partage et la convivialité et on apprécie l'espace et le fonctionnel.

L'entreprise automobile, dans une dynamique de marché très concurrentielle, doit tenir compte dans la définition de ses produits de toutes ces dimensions qui caractérisent les clients et proposer une offre adaptée. Si par le passé, dans une période d'expansion, l'automobile était d'abord le résultat du travail des ingénieurs, elle est maintenant, dans une situation de concurrence exacerbée, conçue dans une démarche associant étroitement la technique et le marché. Sans vouloir décrire les démarches de définition du produit à partir de la connaissance, jamais parfaite, du client, il est intéressant d'avoir quelques idées sur les rapports entre la technique et la perception client. Au-delà de la performance brute, de nombreuses caractéristiques qualifient le produit automobile, confort, agrément, aspects pratiques, robustesse... L'appréciation du confort, par exemple, est liée à notre

perception sensorielle dans toutes ses dimensions, non seulement kinesthésique, c'est-à-dire la perception du mouvement, mais aussi la vue, le toucher, l'ouïe et l'odorat. La qualification au sens du client passe donc par une analyse objective de la perception sensorielle et de l'établissement de relations entre cette perception et les paramètres physiques automobiles correspondants. Citons l'exemple des relations entre impressions acoustiques et spectre de fréquence, ou celui des relations entre impressions au toucher et état physique de la surface de la matière. Ces techniques, dites de métrologie sensorielle, adaptées du secteur des biens de consommation, alimentaire, cosmétique.... sont en plein développement, montrant ainsi que l'automobile, objet de haute technologie pour un usage fonctionnel, est profondément enracinée dans l'univers du marché.

Mais, comme dans d'autres secteurs, la concurrence pousse aussi à anticiper, c'est-à-dire proposer de nouveaux produits qui ne sont pas encore imaginés par les clients, mais qui correspondent à une attente latente. C'est la démarche d'innovation, facteur clé de la compétitivité. L'innovation s'appuie sur la technique, mais l'exploit technique ne fait pas l'innovation. La performance dans ce domaine vient d'une subtile combinaison entre une anticipation clairvoyante et la maîtrise des techniques nécessaires.

*
* *

L'automobile fait partie, nous l'avons dit, de notre univers, elle l'influence et le transforme. Notre cadre de vie est modifié. Par exemple, comme toute activité, domestique ou professionnelle, la circulation engendre des accidents qui sont des drames individuels dont la société se sent responsable, car la mobilité est une affaire collective bien qu'elle relève fortement des comportements individuels. Les constructeurs automobiles, très concernés par cette question, se sont toujours impliqués dans la compréhension des accidents et la conception de véhicules plus sûrs. Depuis plus de vingt ans, les constructeurs français ont mis en commun un potentiel important de recherche dans ce domaine. Le Laboratoire commun d'accidentologie et de biomécanique développe les connaissances sur les causes des accidents ainsi que sur le comportement du corps humain en cas de choc.

L'intérêt de ces travaux peut être illustré par deux exemples, l'un en biomécanique, l'autre en accidentologie.

La ceinture de sécurité est le moyen le plus efficace pour sauver des vies humaines. Cependant, certaines analyses ont montré que la ceinture pouvait avoir un effet traumatisant sur la cage thoracique et que cet effet était plus important~ sur les personnes âgées. La cinématique de la retenue a donc été modifiée en ajoutant à la ceinture un limiteur d'effort qui permet d'amortir le déplacement du corps humain sans dépasser l'effort limite de survenue de blessures au thorax. Dans le futur, les progrès des protections des conducteurs et des passagers se feront par des sacs gonflables de plus en plus « intelligents », grâce à des capteurs qui évaluent la constitution et la position de la personne assise et qui permettent ainsi le « pilotage » des coussins chargés de recevoir et d'amortir le brutal déplacement des corps et des membres.

Un grand pas a été fait en matière de sécurité passive, c'est-à-dire la protection quand la collision est survenue. Il reste quelques marges de progrès mais dont les effets seront relativement marginaux devant ceux qu'aurait le simple port de la ceinture en toute circonstance et à toutes les places. La marge de progrès est, par cette mesure de discipline individuelle, d'environ 900 vies humaines par an.

Dans l'avenir, il est probable que les progrès les plus importants viendront de l'aide au conducteur dans les instants qui précèdent l'accident. Des travaux récents réalisés en simulateur automobile ont permis d'étudier, dans les meilleures conditions de sécurité, la capacité de la personne humaine à détecter les situations critiques qu'on appelle accidentogènes et à agir correctement pour éviter la collision. Ces études ont confirmé clairement qu'une bonne performance dans la perception et le diagnostic permettait d'éviter de très nombreux accidents. Cette étude a montré aussi la grande variabilité entre les différents conducteurs: nous ne sommes pas tous égaux devant l'accident.

Les développements technologiques actuels ouvrent des perspectives nouvelles dans la détection des situations de risque permettant d'alerter le conducteur et peut-être à terme d'engager une procédure d'évitement automatique. Les capteurs RADAR, autrefois réservés de par leur coût prohibitif à des usages militaires, seront capables dans un avenir proche, pour un coût automobile, de décrire l'environnement immédiat du véhicule et donc d'alerter le conducteur de l'imminence d'un conflit possible avec un obstacle fixe ou un mobile environnant. Dans ce nouveau type de fonction, le moyen de transmission de l'alerte au conducteur fait partie des questions les plus difficiles à résoudre.

*
* *

Autant que la sécurité, malgré un impact physique sur les individus et la société beaucoup plus faible, l'environnement est une question qui est devenue de toute première importance pour l'industrie automobile. Je ne développerai pas ici les aspects subjectifs et souvent passionnels des questions environnementales. Je me limiterai aux faits et aux conséquences techniques pour l'automobile et développerai les perspectives futures de cette question.

Le moteur à explosion, version essence ou diesel, est le siège de réactions de combustion extrêmement complexes et très rapides (quelques millisecondes), qui doivent se dérouler suivant un mécanisme idéal ne produisant, comme toutes réactions de combustion même biologiques, que de l'eau et du gaz carbonique, ceci en toutes circonstances, à froid, à chaud, au ralenti, en accélérant... Il est évident que, malgré tous les progrès réalisés sur la conception et le contrôle des moteurs, cet idéal n'est pas atteint. Il a donc fallu ajouter un traitement des gaz d'échappement basé sur des systèmes catalytiques qui permettent de compléter les réactions de combustion et de corriger les effets de réactions parasites. Les principaux composés non prévus par la réaction principale, qui peuvent avoir des effets environnementaux, sont, d'une part, les oxydes d'azote dus à des réactions, dans les conditions de température élevée de la combustion, entre les deux composants de l'air, l'azote et l'oxygène, et, d'autre part, les hydrocarbures et le monoxyde de carbone produits du caractère incomplet des réactions d'oxydation. Ces composés sont donc retraités dans un pot catalytique, sorte de réacteur chimique. Les émissions issues du pot catalytique se comptent maintenant en fraction de grammes par kilomètre, ce qui signifie que les réactions de combustion se déroulent suivant le schéma correct pour une fraction supérieure à 99 %. Dans quelques années avec le renouvellement du parc, trois à quatre milliards de petits réacteurs chimiques d'un volume d'environ un demi-litre, volume de chaque cylindre, fonctionneront dans le monde dans ces conditions. Qui peut prétendre à un tel degré de raffinement ?

L'arrêt des augmentations de taux de présence dans l'atmosphère de ces produits et pour nombre d'entre eux une diminution significative traduisent les efforts de l'industrie automobile dans ce domaine. L'atmosphère des villes du prochain siècle devrait être beaucoup plus pure que celle qui a imprégné nos poumons et ceux de nos parents pendant ce XX^e siècle.

Pour obtenir ces résultats et pour poursuivre les progrès en cours, des travaux très importants de recherche sont entrepris sur les connaissances de la préparation des mélanges carburant-air, sur les mécanismes de combustion en milieu turbulent, sur les réactions catalytiques. Cette compréhension plus fine des phénomènes a permis de mieux dessiner les chambres de combustion et d'améliorer les dispositifs d'injection. Mais c'est le développement très rapide de l'électronique qui a ouvert la voie à la mise au point des capteurs, actionneurs et calculateurs pour mettre en œuvre des stratégies complexes de pilotage du moteur dans toutes les conditions.

Le moteur Diesel, porteur d'une mauvaise image en France alors qu'il est plutôt vert en Allemagne et en forte croissance en Italie, est un moteur naturellement peu émissif. Dans des conditions de combustion en excès d'air, dit en mélange pauvre, il émet très peu d'oxyde de carbone et d'hydrocarbures, ces derniers étant les précurseurs principaux de l'ozone. L'impact environnemental du moteur Diesel sera encore plus faible dans l'avenir avec la généralisation de l'injection directe à très haute pression et du filtre à particules, innovations proposées en premier par le groupe PSA. Ce saut technologique du moteur Diesel est lié au développement de nouveaux modes d'injection très bien contrôlés grâce, là aussi, aux progrès de l'électronique. De plus, ce mode de fonctionnement du moteur Diesel à des taux de compression très élevés permet des rendements plus intéressants, donc des consommations plus faibles.

Dans ce domaine de l'environnement, la solution radicale est celle du véhicule électrique dont le mode de propulsion ne tire pas sa source de l'énergie de la combustion, donc n'émet aucun composé chimique. Mais le stockage d'énergie à bord sous forme de batteries est beaucoup moins efficace : il faut entre 100 et 200 kg de batteries pour contenir autant d'énergie que 1 kg de carburant. L'autonomie des véhicules électriques est donc limitée actuellement à une centaine de kilomètres en espérant atteindre 200 km avec des batteries constituées d'un nouveau couple à base de lithium.

Pour résoudre ce problème d'autonomie, le véhicule électrique de demain sera peut-être propulsé par une pile à combustible qui permet de générer l'énergie électrique à bord du véhicule. Dans une pile à combustible, le carburant, en général de l'hydrogène, se combine à l'oxygène de l'air pour donner directement de la puissance électrique, réalisant ainsi la réaction inverse de celle de l'électrolyse de l'eau, où le courant électrique décompose l'eau en hydrogène et oxygène.

En théorie, nous avons là le système idéal qui ne produit aucune émission. Cependant, dans la pratique, la mise à disposition de l'hydrogène à bord d'un véhicule pose beaucoup de problèmes de stockage et de distribution. Avec une étape de production d'hydrogène à bord, à l'aide d'un réacteur dit réformeur, d'autres types de carburants, tels que le méthanol ou le gazole, pourraient être utilisés. Le développement des piles à combustibles pour la propulsion automobile est un sujet qui fait l'objet d'intenses réflexions. Ce sont des programmes à très haut risque aussi bien technique qu'économique, mais avec des enjeux considérables, car le succès d'une telle filière entraînerait une mutation comparable à celle du passage du moteur à vapeur au moteur à essence à l'aube de l'automobile.

*
* *

Les questions que nous venons de traiter relèvent de l'environnement local modifié dans les fortes concentrations urbaines par les activités humaines dont les déplacements en voiture. Une autre dimension environnementale de l'automobile est celle, à l'échelle

planétaire, de l'effet de serre lié au taux de gaz carbonique (CO₂) dans l'atmosphère. Sans pouvoir évaluer sérieusement les conséquences climatologiques de l'effet de serre, de nombreuses études récentes confirment l'influence des émissions anthropiques sur ce réchauffement. Au niveau mondial, le gaz carbonique produit par le transport routier représente 12 % du total des activités humaines, mais dans les pays développés ce ratio est de 30 %. Pour préparer l'avenir, les constructeurs européens par leur association, l'ACEA, se sont engagés à réduire les émissions de gaz carbonique à 140 g/km en moyenne pondérée à l'horizon 2008. Les émissions actuelles étant de l'ordre de 180 g/km, le gain à réaliser est d'environ 25 %, ce qui est considérable. Cet ambitieux objectif de réduction des consommations demandera de renforcer encore les travaux de recherche et développement sur les moteurs, essence et diesel, ainsi que sur les carburants alternatifs tels que le gaz naturel. La réduction des masses des véhicules est aussi un levier pour abaisser les consommations. L'utilisation d'alliages légers, aluminium et magnésium, devrait se développer.

Que ce soit pour la réduction des émissions ou pour la maîtrise des consommations, la technologie automobile évoluera de façon considérable dans les prochaines années. La chaîne de traction elle-même, c'est-à-dire le moteur et sa transmission, seront profondément bouleversés. L'adjonction de machines électromécaniques jouant le double rôle de moteur et de générateur électrique transformera le groupe motopropulseur classique, moteur, boîte, transmission en un système hybride à la fois thermique et électrique, permettant ainsi de réduire la puissance du moteur thermique, de récupérer l'énergie au freinage, d'arrêter le moteur si son énergie n'est pas nécessaire, toutes ces possibilités devant concourir à la réduction des consommations. C'est le champ très vaste des véhicules hybrides qui devraient prendre un large essor dans les années 2005-2010.

*
* * *

Le développement considérable de l'usage de l'automobile, à cause de son caractère d'autonomie et de disponibilité - « je pars quand je veux où je veux » -, à cause aussi de son adaptation à de nombreuses situations d'habitat et d'emploi, s'est heurté rapidement à des problèmes de saturation dans les grandes zones denses d'habitation. La structuration des villes en Europe, résultat d'une longue histoire, a évolué au XX^e siècle et surtout après la Seconde Guerre mondiale, de façon assez chaotique avec une extension des banlieues due aux possibilités de déplacement apportées par l'automobile. Si, dans les grandes agglomérations, les déplacements radiaux sont en général bien équipés en transports collectifs, les déplacements périphériques ne se font pratiquement qu'en voiture, car les transports collectifs ne peuvent rivaliser en efficacité. Il est intéressant de constater que les durées consacrées aux déplacements journaliers dans les grandes villes sont restées à peu près constantes depuis le Moyen Age, entre une heure et deux heures par jour. L'évolution des moyens techniques a permis d'augmenter la vitesse de ces déplacements, donc des distances parcourues, influençant par-là la répartition de l'habitat.

Les encombrements dus à la saturation de la circulation constituent un problème majeur qu'il faut traiter au même titre que les problèmes d'environnement. Les surcoûts entraînés par la congestion des routes se monteraient à environ 1 % du PiB. Il y a là un gisement de progrès à réaliser très important. Les solutions basées sur le développement des infrastructures sont lentes et coûteuses et se heurtent-elles aussi à des contraintes environnementales. L'optimisation de l'utilisation des infrastructures existantes est une voie beaucoup plus prometteuse ouverte par le développement très rapide des nouvelles technologies de communication associées aux traitements de l'information.

Par exemple, les systèmes d'information sur l'état de la circulation, proposés par de nombreux constructeurs, sont composés d'un ensemble de sous-systèmes : les capteurs de l'état du trafic, le centre d'acquisition et de traitement des données, le diffuseur de l'information, par radio (RDS) ou par téléphonie mobile (GSM), le récepteur à bord du véhicule qui comporte un traitement de l'information et un mode approprié de présentation des informations pertinentes au conducteur souvent sous forme de cartographie sur l'écran de bord. La connaissance par le conducteur de l'état du trafic est un moyen d'optimisation des déplacements par un étalement volontaire dans le temps, suivant une démarche analogue à celle de « bison futé ».

L'aide au guidage est un nouveau service proposé au conducteur qui lui permet d'atteindre une destination quelconque dans une agglomération inconnue sans risque de se perdre. Pour mettre en œuvre cette fonction, il faut deux informations, la connaissance topographique des lieux et le positionnement du véhicule. La première est stockée à bord du véhicule sous forme de mémoire sur disque compact ou peut être obtenue à partir d'un serveur via la téléphonie mobile. La seconde, savoir à tout instant où se trouve le véhicule, est fournie par l'utilisation du GPS, système de positionnement mondial basé sur la réception à bord de signaux satellite. A partir de ces deux informations, le système de guidage donne au conducteur, de façon graphique ou orale, les instructions nécessaires pour se diriger vers sa destination.

Le système de positionnement GPS constitue à mon sens une révolution technologique de première importance qui ouvre la voie à de multiples applications. Seul, il n'a que peu d'intérêt, mais en association avec les moyens de communications disponibles aujourd'hui, de nouvelles fonctions difficiles à mettre en œuvre deviennent accessibles. Citons quelques exemples: installés sur 2 000 à 3 000 taxis parisiens connectés par liaison téléphonique GSM à un central, ils permettent le suivi en temps réel de la circulation en détectant les encombrements et en mesurant les temps de parcours.

En cas de panne ou d'accident, la fonction d'appel d'urgence peut être entièrement automatisée. Un simple bouton ou même un signal associé au déclenchement du sac gonflable met en connexion avec un central qui, connaissant le lieu précis où se trouve le véhicule, lancera les actions de dépannage ou de secours.

Dans un avenir assez proche, les futurs systèmes Gps de très grande précision associés à des moyens de communication sophistiqués seront appliqués à des fonctions de sécurité : réception de message d'information et de prévention, par exemple pour la circulation sur autoroute en cas de collision à quelques centaines de mètres devant votre véhicule ; information de la présence d'un véhicule dans une zone non visible, virage ou haut de côte ; information sur les vitesses recommandées, en cas de circulation dans certaines zones particulières ; et bien d'autres nouvelles applications à créer.

En cette période où les applications du réseau Internet diffusent dans toutes nos activités, on peut se poser la question de son intervention sur l'usage de l'automobile. Dès maintenant, la consultation de certains sites Internet avant un déplacement permet de mieux connaître l'état de la circulation, par exemple sous la forme d'images diffusées en direct de certaines voies particulièrement critiques. Les connexions directes du véhicule avec l'Internet par la téléphonie mobile à haut débit devraient faire surgir de nouvelles fonctions, non encore imaginées à ce jour, liées à la multiplication des interlocuteurs possibles alors que les fonctions évoquées ci-dessus demandent un ou des opérateurs dédiés, donc un abonnement précis.

Le développement de ces techniques de l'information et de la communication devrait aussi favoriser l'interaction entre les différents modes de transport pour une

meilleure efficacité globale de la mobilité. L'information en direct de la disponibilité des parkings dans les gares ainsi que des places dans le train, complétée par la connaissance du trafic, apporterait au voyageur la possibilité de choix en toute connaissance de cause entre les aléas de la circulation confortable en automobile et le désagrément des transports en commun à durée déterminée.

*
* *

Au cours de ce rapide survol des techniques automobiles et de leur futur, un mot est revenu très souvent, le mot « électronique ». En effet, l'électronique et tous ses dérivés ont et auront une influence profonde sur l'automobile ainsi que sur beaucoup des produits qui entourent notre vie quotidienne. L'avènement du transistor et des circuits intégrés a ouvert la voie à la mise au point et au développement industriel de composants dont les prix baissent régulièrement et dont la puissance double tous les dix-huit mois. Ces composants s'imposent dans toutes les fonctions automobiles en les modifiant profondément. Basés sur des circuits intégrés à faible coût, les capteurs mesurent de nombreux paramètres: position pour le volant moteur, la roue, la direction, accélération pour les sacs gonflables et la dynamique véhicule, pression pour les pneumatiques et le moteur, débit pour l'admission, température pour le radiateur et l'habitacle, intensité et tension pour les batteries et les moteurs électriques, composition chimique pour les catalyseurs. A l'aide de circuits intégrés plus complexes, les unités de traitement et de contrôle transforment les signaux des capteurs et des récepteurs en informations qui peuvent être utilisées directement par le conducteur, mais le plus souvent servent à piloter les organes du véhicule: moteur, transmission, suspension, frein, direction, climatisation, etc., jusqu'aux essuie-glaces dont la fréquence de balayage s'adapte au rythme des gouttes sur le pare-brise.

Ces évolutions profondes ont aussi transformé les modes de transmission et d'application de la puissance aux organes actifs du véhicule. De purement mécanique ou hydraulique, les transferts de puissance sont devenus électriques, électrohydrauliques ou électromécaniques et leur contrôle se fait par voie électronique. Les progrès en électronique de puissance, c'est-à-dire la régulation et le contrôle des fortes intensités et haute tension, ont permis le développement de nouveaux actionneurs ouvrant ainsi de nouvelles voies dans tous les organes de l'automobile : les injecteurs électromécaniques et bientôt piézoélectriques, les freins électrohydrauliques, les amortisseurs pilotés, les directions électriques, les transmissions électriques de certains véhicules hybrides...

L'automobile de demain sera un objet hybride régi par la mécanique et l'électronique, un objet « mécatronique » où un ensemble de circuits porteront les informations et les commandes vers les différents organes du véhicule sans lien mécanique entre le conducteur et sa machine. Nous rejoindrons par là la structure de fonctionnement des avions récents. Pour préciser la situation de l'automobile d'aujourd'hui, sachez qu'un haut de gamme comporte 2 km de fils et que la remplaçante de la Peugeot 605, qui doit sortir en l'an 2000, aura autant de logiciels que l'Airbus A310 de 1982.

Mais l'influence de l'électronique et des circuits intégrés s'exerce aussi sur le métier automobile lui-même par l'introduction massive de l'informatique à tous les stades allant de la conception à la distribution. En production, la robotique a profondément transformé les opérations d'assemblage et de montage. Les lignes d'assemblage de la caisse, par exemple, sont constituées de robots de soudure dont le ballet s'accompagne des multiples étincelles de la soudure électrique permettant ainsi des opérations très précises sans intervention manuelle mais demandant un équipement informatique sophistiqué et un

personnel de haut niveau. Au stade de la conception, la CAO (conception assistée par ordinateur) est maintenant complétée par des moyens de calcul très puissants permettant de simuler toutes les sollicitations appliquées au véhicule avant d'en construire des prototypes. Le processus de conception en a été complètement révolutionné. Le cycle dessin, expérimentation, correction a été complété par le calcul sous la forme de cycles combinés dessin, calcul, expérimentation, correction, où le calcul a permis une diminution très importante des expérimentations au stade prototype complexes. Cette révolution a permis et permettra de poursuivre encore le raccourcissement considérable des cycles de développement et d'augmenter la qualité des produits. Mais cette évolution n'a pu se faire et ne peut encore s'améliorer que par une connaissance accrue des phénomènes physiques mis en jeu, pour pouvoir introduire dans les calculs les modélisations correctes nécessaires à l'obtention de résultats fiables. Les développements les plus récents de la microélectronique et des logiciels permettent d'obtenir des temps de calcul très courts et donc de simuler certains comportements en temps réel. Ces percées technologiques ont ouvert la voie aux simulateurs routiers interactifs où un conducteur, plongé dans un environnement routier simulé, conduit une voiture virtuelle dont le comportement dynamique sur la route est celui de la voiture en cours de conception. L'ajustement des paramètres des trains et des liaisons au sol peut ainsi se faire avant le stade prototype. Toutes les pièces et organes de la voiture ainsi que les comportements tels que choc, acoustique, aérodynamique, thermique.... font l'objet de recherches intensives pour parvenir aux meilleures modélisations pour disposer des outils d'aide à la conception les plus performants.

A la fin de ce parcours très rapide sur les techniques de l'automobile du XXI^e siècle, je voudrais souligner l'extraordinaire vitalité de cet étrange objet à quatre roues qui ne cesse de se transformer pour apporter à son propriétaire toujours plus de confort et de sécurité, souvent en le faisant rêver, mais aussi en s'adaptant aux nouvelles exigences de la société. C'est un exemple très illustratif de l'interaction entre la technique et l'homme dans ses dimensions individuelles aussi bien que collectives au sein de la société.