

# La mobilité urbaine

*Stéphane Delalande est docteur-ès-sciences, il est en charge, à PSA<sup>1</sup> groupe, des relations avec l'université, les centres de recherche et les partenariats scientifiques externes.*

## 1 État des lieux sur la mobilité urbaine

### 1.1. Un peu d'histoire : de la deux-chevaux à nos jours

Beaucoup de lecteurs, à n'en pas douter, se souviendront de cette fameuse voiture : la 2CV<sup>2</sup> Citroën (*Figure 1*). C'était une voiture passe-partout ! Son cahier des charges était simple, relié à la ruralité prédominante à cette époque, et pouvait être formulé en termes simples : « quatre places sous un parapluie, 50 kg de bagages et la voiture devra pouvoir traverser un champ avec un panier rempli d'œufs sans en casser un seul ». Certes, c'était une rupture à l'époque !

Cette vision simplifiée peut se transposer dans un monde moderne. Nous pouvons

prendre comme exemple la C4 Cactus ; elle a une planche de bord aussi dépouillée que la 2CV, cependant il apparaît des écrans tactiles... une touche de modernité (*Figure 2*).

La C4 Cactus, comme sa devancière, est équipée de banquettes à l'avant et à l'arrière. Son utilisation en milieu urbain la voit s'habiller de larges panneaux de protection latérale... ! Afin de se prémunir de tous les petits chocs qu'une utilisation citadine majoritaire induit inévitablement et qu'une peinture, si bonne soit-elle, ne pourra jamais encaisser.

Pour réaliser ces pièces, la chimie a été d'un grand secours ainsi qu'un peu d'ingénierie, en utilisant une peau en polyuréthane<sup>3</sup> (PU) surmoulée sur une

1. [www.groupe-psa.com](http://www.groupe-psa.com)

2. 2CV : la deux-chevaux est une voiture populaire de Citroën produite dans les années 50 à 80.

3. Polyuréthane : polymère notamment utilisé pour fabriquer des élastomères (matériau aux propriétés élastiques).



Figure 1

La 2CV Citroën, voiture emblématique des années 1950.

Source : Wikipédia, licence CC-BY-SA-3.0, Andrzej O.

armature en ABS<sup>4</sup> et fixée avec des soudures laser. De l'air est piégée dans les bulles, qui sont « munies » d'un petit trou permettant une respiration de l'ensemble lorsque qu'il est sollicité en compression.

De tels panneaux paraissent faciles à concevoir mais un cahier des charges automobile induit

4. ABS (Acrylonitrile Butadiène Sty-rène) : polymère thermoplastique présentant une bonne tenue aux chocs. Rigide et léger, on peut le mouler pour faire des armatures.

des contraintes majeures. Ainsi, il a fallu faire évoluer la chimie du polyuréthane pour qu'ils résistent suffisamment au nettoyage, qu'ils ne se rayent pas, ne vieillissent pas aux UV. De nombreuses évolutions de la formulation chimique de ce PU ont été nécessaires.

Chaque fonction de la voiture nécessite une connaissance fine de la chimie, afin de pouvoir faire respecter aux matériaux les normes telles que : les chocs piétons, les chocs latéraux, les vieillissements,... Les matériaux évoluent pour améliorer leurs propriétés et offrir le maximum de sécurité aux personnes présentes à l'intérieur du véhicule tout en garantissant une durabilité à l'usage optimum.

## 1.2. La situation actuelle : un monde urbain

L'évolution du design de l'automobile est à la fois conséquence et cause de l'évolution du profil des villes. Lorsque la 2CV a été conçue, entre les années 30 et les années 40, le monde était rural ; aujourd'hui, il est majoritairement urbain. Les besoins et



Figure 2

La nouvelle C4 de Citroën, avec un intérieur moderne et des panneaux de protection latérale.

les usages ont évolué, les matériaux disponibles également, modifiant profondément les formes et les équipements des automobiles.

### 1.3. Les défis : créer la voiture pour la ville de demain

La devise d'une direction scientifique devrait être « *Nos défis d'aujourd'hui sont nos opportunités de demain !* (Figure 3) ». Une ville plus importante impose de nouveaux schémas de mobilité ; il faudra offrir de nouveaux véhicules mais surtout les adapter à un monde de plus en plus communicant : les buildings communiquent entre eux, bientôt les voitures communiqueront entre elles et avec les bâtiments afin de garantir une continuité dans l'usage.

Dans toutes les réflexions, les considérations économiques doivent être présentes. Les voitures deviennent de plus en plus complexes et luxueuses, mais il faut continuer à construire des voitures pour tout le monde – tout le monde a besoin d'une voiture à un moment ou un autre de sa vie, pour aller travailler ou pour partir en vacances. C'est un instrument de liberté qui est devenu indispensable à tous.

Depuis plusieurs années, il y a eu une prise de conscience de l'impact des véhicules sur l'environnement, pas seulement au cours de leur utilisation mais aussi pendant leur fabrication. C'est maintenant un objectif incontournable que de réduire au maximum cet impact environnemental.

Les grands objectifs de l'industrie automobile aujourd'hui sont clairs :

- réduire l'impact environnemental est un axe prioritaire de nos innovations. Il faut tenir compte des analyses de cycles de vie, utiliser les énergies renouvelables lors des étapes de fabrication (installation de panneaux solaires sur les toits des usines), maîtriser les rejets dans l'environnement, développer tout ce qui concerne les clean-technologies ;

- alléger les véhicules pour économiser l'énergie. Cela est techniquement aisé sur des véhicules très chers, mais il faut aussi l'appliquer sur des véhicules de grandes séries car tout le monde ne peut pas s'offrir des voitures de luxe.

Le leitmotiv de base de l'industrie automobile reste primordial : assurer qualité et sécurité. Cela met en jeu autant de la sûreté intrinsèque du véhicule que du comportement quotidien des usagers, mais également la sécurité des personnes fabricant les véhicules.

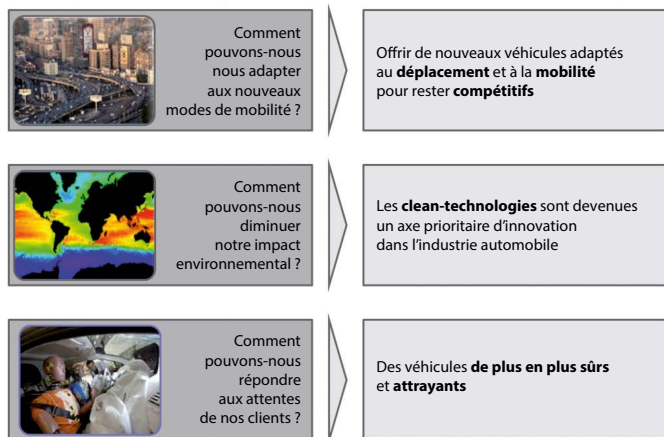


Figure 3

Nos défis d'aujourd'hui sont nos opportunités de demain.

## 2 Les matériaux, l'environnement et la chimie dans le monde de l'automobile

Pourquoi la chimie ? C'était un des refrains préférés d'un de nos anciens directeurs de la direction matériaux il y a une vingtaine d'années.

### 2.1. La voiture de demain

Un véhicule d'une tonne, ce sont 1 000 kg de matériaux. Même le prototype sur la *Figure 4*, une Peugeot en fibres de carbone et en cuivre, n'est constitué que de matériaux – les métaux, le verre, même les semi-conducteurs –, résultat du travail des chimistes, que l'on retrouve à toutes les étapes, pour les mises au point du passé comme pour les innovations et les développements pour l'avenir.

L'évolution des véhicules passe nécessairement par l'évolution des matériaux qui les constituent. L'objectif est de fournir un véhicule pour tout le monde, adapté à une société globale (*Figure 5*), c'est-à-dire, comme indiqué plus haut, sachant communiquer, économisant l'énergie, à l'impact environnemental le plus faible possible et assurant une sécurité maximum pour ses usagers.

Objectif plus récent propre au groupe PSA, mais maintenant incontournable, il faut aussi, pour minimiser l'impact environnemental, travailler avec des matériaux recyclés. La difficulté, en l'occurrence, est de conserver les propriétés initiales des matériaux à travers les transformations du recyclage. Même pour les

thermoplastiques<sup>5</sup>, le recyclage a des limites car, à force de recycler, des liaisons se rompent sur les chaînes polymères, et les performances chutent. Ainsi, quand on recycle du plastique, il faut veiller à conserver le rôle protecteur des antioxydants<sup>6</sup>.

L'objectif de diminuer les émissions de CO<sub>2</sub> conduit à développer de nouveaux matériaux. Il peut s'agir de biomatériaux, de matériaux « verts » ayant les mêmes propriétés que les matériaux issus du pétrole. Il peut aussi s'agir de matériaux composites<sup>7</sup> mais restant à des coûts raisonnables.

La réduction des émissions de CO<sub>2</sub> et autres polluants par les moteurs passe par une mobilisation des chimistes autour de la catalyse<sup>8</sup> mais aussi dans la conception de nouveaux capteurs puisque pour améliorer la catalyse, la connaissance fine des gaz émis par le véhicule s'avère de plus en plus nécessaire.

5. Thermoplastique : matière plastique qui peut, de manière répétée, être ramollie sous l'action de la chaleur pour changer de forme et durcie par refroidissement, sans modifier ses propriétés mécaniques.

6. Antioxydant : substance utilisée pour retarder la dégradation de certains produits et en assurer un meilleur vieillissement.

7. Matériau composite : produit solide comportant au moins deux constituants distincts dont une matière plastique, réunis par un matériau de liaison.

8. Catalyse : réaction physico-chimique permettant à des substances dites catalyseurs d'accélérer la vitesse des réactions chimiques. Les catalyseurs agissent à des concentrations infinitésimales et se retrouvent inchangés en fin de réaction.



Figure 4

Peugeot Onyx : concept car de voiture de sport du constructeur avec une carrosserie composée de cuivre et de fibre de carbone : 1 000 kg de matériaux et beaucoup de chimie !

Source : Wikipédia, licence CC-BY-SA-3.0, Liondartois.



Figure 5

Les défis de l'industrie automobile pour une mobilité durable. La voiture de demain doit répondre à différents critères sur la réduction des émissions de gaz et son impact environnemental tout en restant accessible à tous et en répondant aux normes de sécurité.

Le confort du conducteur, qui s'avère être un facteur de sécurité, est évidemment pris en compte pour la voiture de demain, comme l'illustre le développement de la « vision tête haute » (**Encart : « La technique "vision tête haute" »**), qui pose des défis aux physico-chimistes pour le développement de dispositifs accessibles à tous.

## 2.2. Capteurs et catalyseurs

Une tendance de fond dans les projets de mobilité du futur est le développement du véhicule autonome : le véhicule sans conducteur. Ce concept repose sur l'utilisation d'une très grande diversité de capteurs. Aujourd'hui, certains sont coûteux et difficiles à implanter sur tous les véhicules.

## LA TECHNIQUE « VISION TÊTE HAUTE »

Cette expression désigne la capacité de lire les informations sur la conduite directement sur le pare-brise et non plus sur un tableau de bord séparé. La « vision tête haute » a d'abord été développée pour les avions de chasse. Quand on vole à 1 500 ou 2 000 km/h, les temps d'adaptation entre le près et le loin sont très difficiles, ils induisent en plus de la fatigue chez le pilote, résultant d'accommodation rapide et fréquente de son champ de vision. Il faut un système de vision qui lui évite d'avoir à le faire constamment. Ces technologies ont dans un premier temps été installées dans les avions mais pas dans les véhicules automobiles car les impératifs de coût pour les deux domaines d'application étaient très différents.

Aujourd'hui, des constructeurs ont démocratisé cette technologie et l'ont adaptée à leurs véhicules. La technologie demande de savoir réaliser des lames nécessitant des traitements chimiques de surface, une conception relativement compacte des trajets optiques pour obtenir un affichage qui corresponde à une vision compatible avec l'adaptation à l'infini (Figures 6 et 7).

Suivant les technologies employées, il faut maîtriser les angles des vitrages réalisés dans le verre, adapter leur chimie, contrôler les variations d'épaisseur locales voulues, adapter les PVB\*. Une solution technologique alternative pour compacter encore ces systèmes consiste à utiliser la plasmonique. Cela nécessite de réaliser des dépôts d'or ou d'argent de très petites dimensions sur des surfaces de verre afin de modifier les propriétés de la matière. Ces axes de travail font appel aux chimistes pour faciliter l'adhésion des revêtements, empêcher l'oxydation de ces matériaux, faire des revêtements durables...



Figure 6

La vision tête-haute fait apparaître les indications du tableau de bord sur le pare-brise.

Source : Wikipédia, licence CC-BY-SA-3.0, Affemitwaffe.

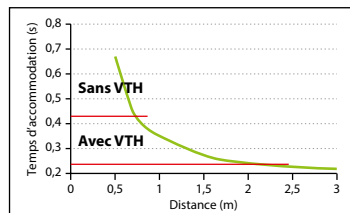


Figure 7

La vision tête-haute (VTH) permet d'avoir un temps d'accommodation beaucoup plus court.

\*PVB (poly(butyril vinylique)) : polymère utilisé pour séparer le verre feuilleté.

L'idée est de les faire évoluer, par exemple en remplaçant les capteurs infrarouges actuels par des capteurs moins coûteux.

Parmi les techniques clés pour la réalisation des cap-

teurs, il faut citer la MOCVD<sup>9</sup> (« *Molecular Organic Chemical*

9. MOCVD (« *Metal Organic Chemical Vapor Deposition* ») : épitaxie<sup>10</sup> en phase gazeuse qui a une bonne reproductibilité et des fortes vitesses de croissance accessibles.

Vapor Deposition ») et l'épitaxie<sup>10</sup>. Cette dernière technique est coûteuse parce qu'elle se fait sous ultravide, alors que la MOCVD travaille en milieu gazeux basse pression.

Afin de diminuer et d'éliminer les rejets « polluants » dans l'atmosphère, des catalyseurs à métaux précieux ont été introduits sur les lignes d'échappement des véhicules. Les recherches actuelles s'orientent vers le développement de catalyseurs sans métaux précieux afin d'en réduire les coûts et obtenir des activités catalytiques à plus basse température.

Un axe important de nos travaux est le développement de matériaux en rupture. Dans le cadre d'un de nos partenariats OpenLab<sup>11</sup> (**Encart : « L'approche OpenLab »**), la chimie des sol-gel<sup>12</sup> et des hybrides organiques/inorganiques est étudiée. Ces voies de synthèse sont à l'œuvre dans la chimie du vivant elle-

même et sont très fécondes en chimie de synthèse (**Figure 8**).

Un autre exemple très prometteur pour cette chimie est le contrôle de la physico-chimie des surfaces. Il est possible par un traitement approprié de modifier l'indice de réflexion des vitrages tout en obtenant une surface hydrophobe et catalytique. Changer l'indice de réflexion des vitrages permettra de supprimer les reflets des planches de bord dans le pare-brise, ce qui permet d'assurer un confort visuel au conducteur tout en laissant aux designers de plus grandes libertés de conception et de choix de teintes. D'autres sujets de recherche concernent le développement de systèmes de production d'énergie en rupture, les aérogels pour l'iso-

#### L'APPROCHE « OPENLAB »

Pour saisir les innovations en rupture dans la chimie du futur, PSA a créé un ensemble de collaborations fédérées au sein du réseau Stellab. Dans les OpenLabs, se déploient des relations privilégiées avec un ensemble de laboratoires mondiaux d'excellence, des échanges ouverts entre des chercheurs et les ingénieurs de recherche du groupe PSA.

Sur la chimie des matériaux, un OpenLab autour des thématiques « chimie-physique et biochimie des matériaux », en collaboration avec le LCMCP (Laboratoire Chimie de la Matière Condensée de Paris) et l'Institut Lavoisier, étudie par exemple la filtration avec les MOF\* (« *Metal Organic Framework* »). L'espoir est de capter et de dégrader tous les polluants qui pourraient se trouver dans un environnement fermé – bâtiment ou véhicule.

\*MOF (« *Metal Organic Framework* ») : réseau dans lequel des atomes métalliques sont reliés entre eux par des molécules organiques de manière à former un réseau dont la structure périodique à une, deux ou trois dimensions comporte des espaces vides pour permettre le stockage d'une matière gazeuse

10. Épitaxie : technique de croissance de cristaux utilisée pour former, par réaction chimique, de fines couches de matériaux d'une autre espèce chimique que celle du substrat mais ayant une structure cristalline identique.

11. OpenLab : un lieu et une démarche portés par des acteurs divers, en vue de renouveler les modalités d'innovation et de création par la mise en œuvre de processus collaboratifs et donnant lieu à une matérialisation physique ou virtuelle.

12. Chimie par procédé sol-gel : procédé de synthèse de matériaux verriers ou céramiques dans lequel on part d'une suspension de particules solides, un sol, qui est déstabilisé pour conduire, par agrégation spontanée des particules, à un gel, puis à un solide.

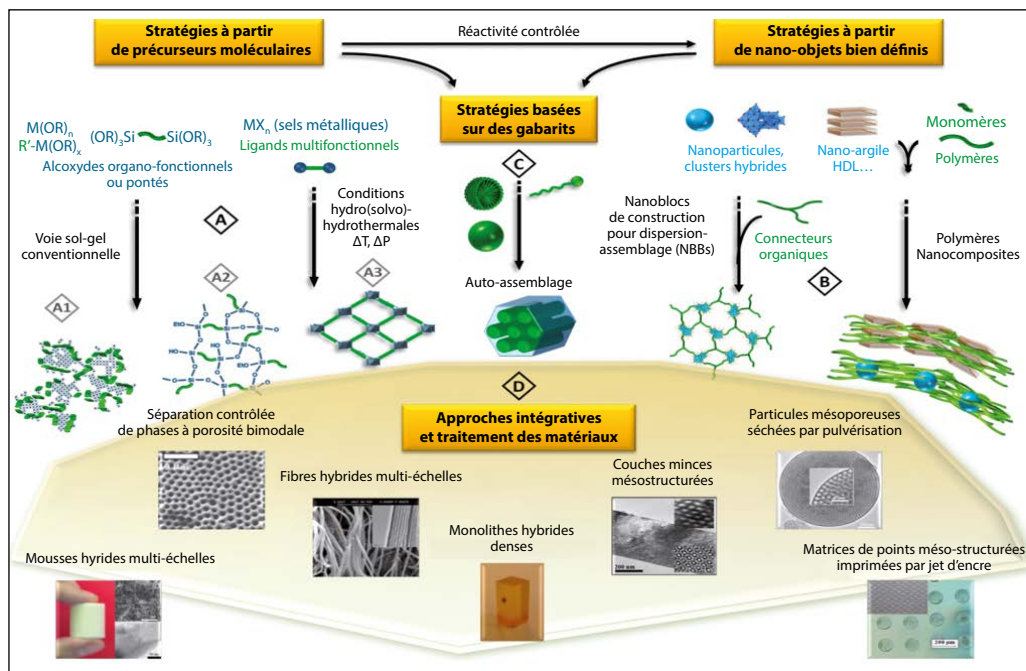


Figure 8

Étapes de recherche pour la synthèse de nouveaux matériaux pour catalyseurs. Les techniques de chimie sol-gel sont très fécondes.

Source : Sanchez C., Belleville P., Popalld M., Nicole L. (2011). Applications of advanced hybrid organic-inorganic nanomaterials: from laboratory to market, *Chem. Soc. Rev.*, 40 : 696-753.

lation. Ce dernier sujet, économiser l'énergie thermique, trouve son importance pour le véhicule électrique puisque moins d'énergie sera disponible pour la climatisation.

### 2.3. Exemple de la nouvelle 308

Le terme « matériaux verts » désigne, pour l'essentiel, des matières plastiques dont la fabrication ne doit rien à la pétrochimie. Le pétrole étant en voie de raréfaction et les matériaux plastiques ayant pris une place dominante dans l'industrie moderne, fabriquer les matériaux plastiques à partir de matière organique

naturelle sans consommer du pétrole supplémentaire est une « révolution nécessaire ». Cette voie, étudiée par les laboratoires depuis de nombreuses années maintenant, est en train de s'imposer comme une solution technique parfaitement validée. La nouvelle Peugeot 308 en donne un exemple emblématique.

La nouvelle 308 est un véhicule où 22 % des matériaux plastiques ont été substitués par des matériaux verts (Figure 9), ce qui correspond environ à 45 kg. Sur ces 45 kg, 19 % sont des matériaux à fibres naturelles, 79 % des matériaux recyclés et 2 % des polymères naturels. Réutiliser la matière





L'argus

Figure 9

La nouvelle 308 de Peugeot : 45 kg de matériaux verts dont 19 % de matériaux à fibres naturelles, 2 % de biopolymères et 79 % de matériaux recyclés.

usagée pour en refaire de la « neuve » est très avantageux sous l'angle de l'impact environnemental. L'introduction des biopolymères<sup>13</sup> reste limitée du fait des risques de surcoûts importants ou de la médiocrité relative des propriétés de certains biopolymères par rapport aux polymères pétrosourcés.

Une des applications majeures, mise en œuvre pour la 308, a été de réaliser et d'introduire pour la première fois des pièces injectées de grandes dimensions avec un mélange polypropylène/fibres de chanvre ; les panneaux de portes et médaillons sont fabriqués avec cette matière et permettent un gain de masse de l'ordre de 20 %. Pour d'autres éléments du véhicule, le coton, le lin, la cellulose et la laine sont utilisés.

13. Biopolymère : ensemble des macromolécules biologiques résultant de l'assemblage d'unités de répétition appelées monomères. On peut citer les protéines, les polysaccharides, ou encore l'ADN.

Il faut noter que toutes ces évolutions ont été réalisées à iso cahier des charges pour garantir et préserver les qualités du produit final.

#### 2.4. Les matériaux et la chimie pour l'allègement des véhicules

L'« impact CO<sub>2</sub> » d'une voiture, une préoccupation très actuelle de l'industrie automobile, conduit à des objectifs d'allègement des véhicules. Voici quelques résultats, illustrés sur la [Figure 10](#), des modifications résultant des travaux sur les matériaux composites. Ces exemples montrent que le rôle du chimiste est clé :

- renforts de portes pour choc latéral : une solution composite avec des renforts tissés en fibres de verre a été développée. Il a fallu synthétiser un copolymère qui permette d'avoir une résistance thermomécanique optimale, mais aussi permettre la meilleure mouillabilité possible

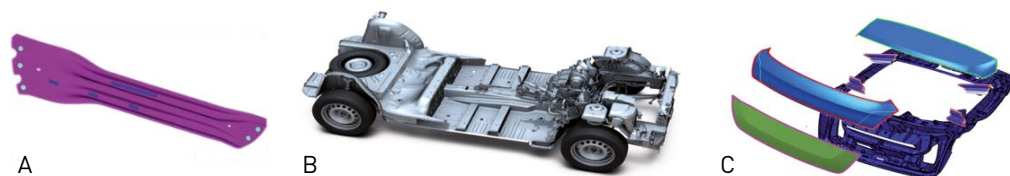


Figure 10

Exemples de recherches visant à diminuer l'impact  $CO_2$  d'une voiture. Illustrations pour un renfort de porte pour choc latéral (A), un plancher en matériau composite (B) et des hybrides métal-composite (C).

des renforts. Le choix s'est porté sur un copolymère PA6/PA6,6<sup>14</sup> développé avec DuPont de Nemours ;

- un plancher arrière de charge en matériau composite (en SMC<sup>15</sup>) a été développé avec la société Plastic Omnium : un travail de chimiste a été nécessaire pour formuler des matières à faible taux de styrène et en limiter ainsi les émissions ; des « ouvrants arrière » en composite

thermoplastique-thermodurcissable<sup>16</sup> ou thermodurcissable-thermodurcissable ont également été développés ;

- des études prometteuses sont entreprises sur la mise au point d'hybrides métal-composite à base de fibres de carbone. Le problème est celui du coût excessif des fibres de carbone actuelles ; c'est pourquoi des voies de synthèse à partir de cellulose<sup>17</sup> sont étudiées.

14. Copolymère PA6/PA6,6 : association de polyamides  $[NH-(CH_2)_6-NH-CO-(CH_2)_4-CO]_n - [NH-(CH_2)_5-CO]_m$

15. SMC (« Sheet Molding Compound ») : procédé par compression pour la mise en forme des matériaux composites.

16. Thermodurcissable : se dit d'une matière plastique qui perd définitivement son élasticité sous l'action de la chaleur.

17. Cellulose : constituant principal de la paroi cellulaire des tissus végétaux et qui participe à leur soutien et à leur rigidité.

## La voiture de demain : et le rêve deviendra réalité ?

Les recherches et développements présentés dans ce chapitre sont des étapes qui nous conduisent vers des voitures complètement différentes de celles que nous connaissons actuellement. Elles seront différentes car les situations d'usage auront changé, le rôle ou les tâches du conducteur et des passagers également.

Une représentation rêvée de cette voiture du futur est accessible grâce aux vidéos mises à disposition par la DSTF (Direction Scientifique et Technologies Futures) du groupe PSA<sup>18</sup>. Ces vidéos, pleines d'innovations, sont, entre autres, alimentées par les travaux des projets transversaux « *Energy Information* », « *Skintech* », « *Vie à bord* » de la DSTF. Elles mettent en scène des technologies disponibles à différentes échelles temporelles dans des situations d'usages réalistes et s'intègrent dans une démarche globale de synthèse des travaux de DSTF, en complément des démonstrateurs physiques installés existant au StelLab.

Le chemin vers ces horizons est encore long et plein de défis pour les chercheurs, et tout particulièrement pour les chimistes. Les défis sont dans le domaine des matériaux (matériaux à mémoire de forme, matériaux plastiques), sur la combustion, sur les moteurs. Il faut également entrer plus avant dans la conception des systèmes de communication, si prometteurs pour les usagers. En l'occurrence la question de la sécurité des communications est bien évidemment des plus critiques.

La voiture du futur, quelle perspective ! Mais quel chantier et quels défis pour les scientifiques et les ingénieurs, et tout particulièrement les chimistes !

---

18. [www.youtube.com/watch?v=LjBoDpfGGio&feature=youtu.be](http://www.youtube.com/watch?v=LjBoDpfGGio&feature=youtu.be)

