

# Les infrastructures de transport et l'exploitation du réseau

*Roseline Legrand est directrice générale adjointe du SYTRAL<sup>1</sup> (SYndicat mixte des Transports pour le Rhône et l'Agglomération Lyonnaise).*

*Henri Van Damme est directeur scientifique de l'Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux (IFSTTAR)<sup>2</sup>.*

## 1 Le cas des transports urbains de l'agglomération lyonnaise

D'après la conférence de Roseline Legrand

### 1.1. Présentation d'une autorité organisatrice des transports : le SYTRAL

Une autorité organisatrice des transports est une collectivité publique en charge de l'organisation des transports publics urbains. Pour le

SYTRAL, le périmètre d'action couvre 68 communes, environ 600 km<sup>2</sup> de surface (20 km sur 30), et représente une population de 1,3 millions d'habitants (**Figure 1**).

Le réseau de transports en commun lyonnais est le deuxième réseau de France en termes d'offre et d'usage, avec cinq modes de transport : métro, funiculaire, tramway, trolleybus et bus. Il assure 1,4 millions de voyages par jour. Les caractéristiques du réseau lyonnais

1. [www.sytral.fr](http://www.sytral.fr)

2. L'IFSTTAR est un organisme public civil de recherche français (EPST) créé par décret interministériel du 30 décembre 2010. Il est placé sous la tutelle du ministère de l'Écologie, du développement durable et de l'énergie et du ministère de l'Enseignement supérieur et de la recherche. [www.ifsttar.fr](http://www.ifsttar.fr)

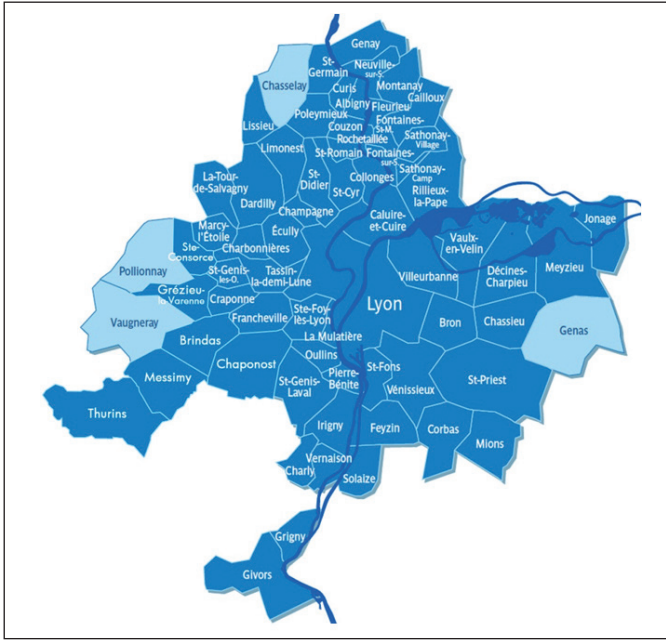


Figure 1

Périmètre d'action du SYTRAL :  
 - 58 communes et 4 villes périphériques ;  
 - adhésion de six nouvelles communes en 2013 (Brindas, Chaponost, Greyzieu-la-Varenne, Messimy, Ste Consoce and Thurins) ;  
 - 613 km<sup>2</sup> ;  
 - 1,3 million d'habitants.

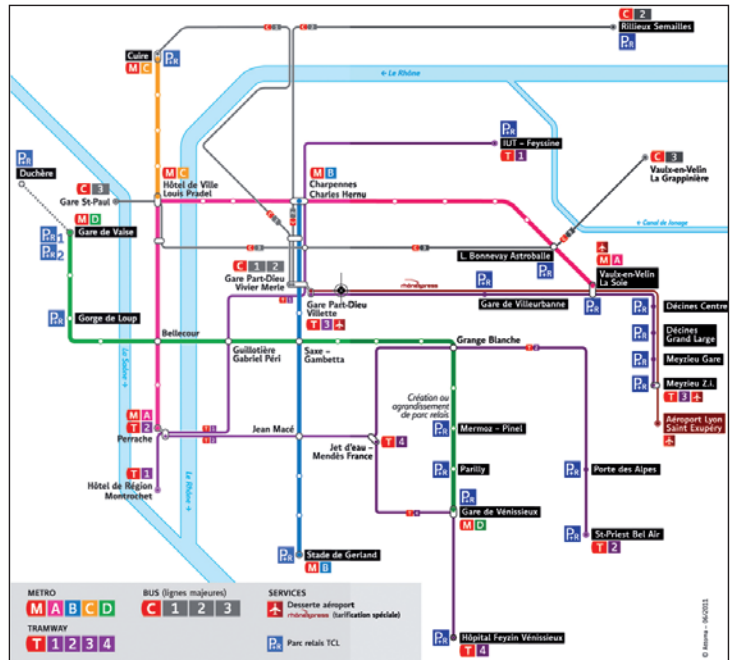
sont d'abord la continuité entre les modes de transports (le maillage), à la fois entre les différents modes

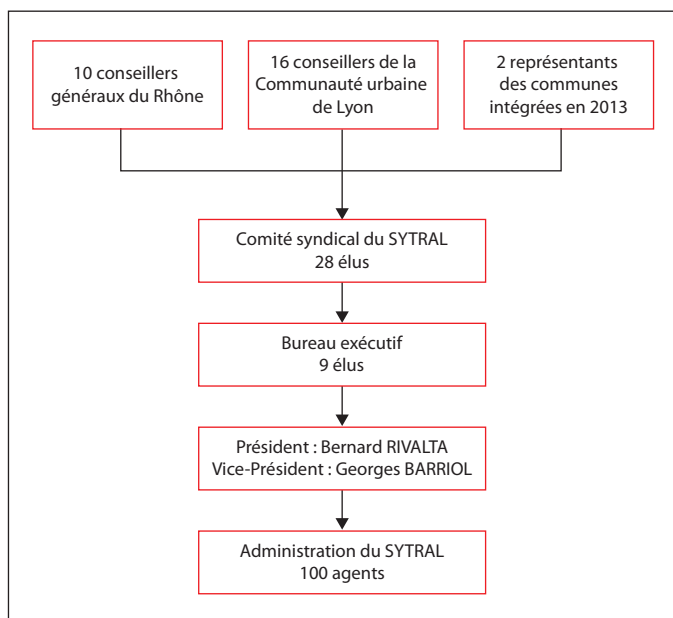
de transport en commun, mais aussi avec les infrastructures routières, par le biais de parkings relais, que

l'on voit en bleu sur le plan simplifié du réseau (Figure 2), et qui contient 7 000 places de parking ainsi que la prégnance des déplacements électriques (70 % des déplacements se font sur le mode électrique) grâce au métro, au tramway et au trolleybus. La gouvernance du SYTRAL est composée d'élus, à la fois de la communauté urbaine de Lyon et du Conseil général du Rhône (Figure 3).

Figure 2

Schéma du réseau de transports lyonnais.





**Figure 3**

Structure du SYTRAL.

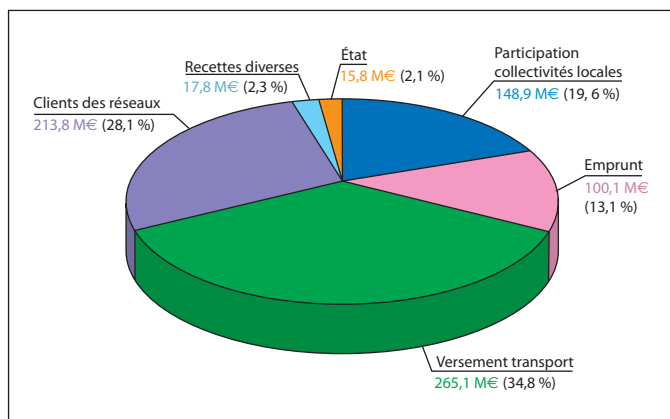
Le rôle d'une autorité organisatrice de transports, c'est d'abord de financer le réseau de transport et son développement, d'assurer la propriété de toutes les infrastructures, de l'équipement et du matériel roulant qui composent ce réseau ; c'est de déterminer l'offre de transport adaptée à la fois aux évolutions démographiques, économiques et urbanistiques de l'agglomération ; c'est également de déterminer la politique tarifaire et de définir les normes et les qualités de service. En revanche, le SYTRAL n'est pas un exploitant. L'exploitation est déléguée à des entreprises et il s'agit à Lyon de l'entreprise Kéolys, comme il s'agit en Ile-de-France, par exemple, de la RATP notamment.

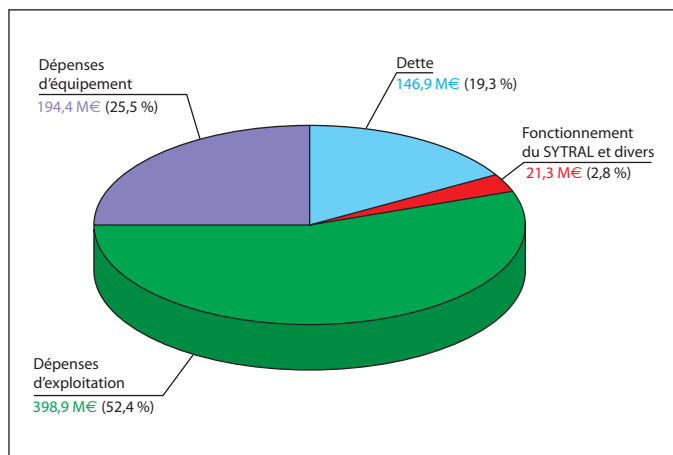
Le budget du SYTRAL est d'environ 760 millions d'euros (**Figure 4**). La première source du SYTRAL est ce

qu'on appelle le « versement transports », une taxe payée par les entreprises et basée sur leur masse salariale. La deuxième ressource du réseau, qui représente environ 28 % des ressources, ce sont les produits de la vente de tickets, de la vente d'abonnements et des amendes. Enfin, la troisième ressource est la participation des collectivités locales à hauteur de 20 %

**Figure 4**

Répartition des recettes du SYTRAL - 761,5 M€ (budget 2013).





**Figure 5**

Répartition des dépenses du SYTRAL – 761,5 M€ (budget 2013).

environ ; cette ressource provient de l'impôt local, participation à la fois du Grand Lyon, de la communauté urbaine et du conseil général du Rhône.

Pour ce qui concerne les dépenses SYTRAL (**Figure 5**), plus de la moitié en sont liées à l'exploitation du réseau – c'est ce que le SYTRAL verse à son exploitant – et un quart sont des dépenses d'investissement, d'exploitation du réseau et de renouvellement du patrimoine du matériel roulant.

### 1.2. Économiser l'énergie, décarboner et dépolluer les transports urbains : les enjeux du SYTRAL

Conformément aux engagements politiques pris à tous niveaux, les objectifs prioritaires adoptés sont la « décarbonation » et la dépollution. La décarbonation signifie la limitation des émissions de gaz à effet de serre, et donc la lutte contre le réchauffement climatique. La dépollution, c'est la limitation des émissions polluantes locales auxquelles sont exposés les

habitants. Ce sont des préoccupations qui sont distinctes et d'ailleurs parfois antagonistes : ainsi, une ville compacte permet de réduire les distances parcourues et est donc favorable à la limitation des gaz à effet de serre ; elle n'est pas forcément propice pour réduire l'exposition d'une grande partie de la population aux polluants locaux, aux particules fines notamment.

Face au changement climatique donc, le Grand Lyon s'est fixé pour objectif de devenir une agglomération sobre en carbone, en s'engageant à réduire d'ici 2020 ses émissions de CO<sub>2</sub> de 20 %, de réduire également de 20 % sa consommation énergétique et d'accroître sa part d'énergies renouvelables, en consommant 20 % d'énergies renouvelables.

Une agglomération sobre en carbone, cela veut dire des transports sobres en carbone. Cela implique d'abord de limiter l'utilisation de la voiture en ville, par exemple en réduisant les possibilités de stationnement et en diminuant les infrastructures routières au profit d'autres modes comme la marche, le vélo ou les transports en commun. Il faut aussi favoriser le report modal (optimiser le choix du moyen de transport), notamment par la création d'une centrale de mobilité, qui permet de calculer des itinéraires tous modes – voiture, transports en commun, vélo, marche à pied – en fonction des conditions réelles de circulation. Il faut également développer le covoiturage et l'utilisation de voitures en libre-service.

Enfin, et ceci concerne plus directement le SYTRAL, on a adopté l'objectif d'*augmenter de 25 % le nombre de voyages en transports en commun d'ici 2020*, ce qui est le double de l'augmentation tendancielle. Si l'on y arrive à augmenter ces voyages de 25 %, cela permettra de réduire les émissions de CO<sub>2</sub> de 75 000 tonnes par an, c'est-à-dire réduire de 1 % les émissions de CO<sub>2</sub> de l'agglomération.

Pour ce qui concerne la pollution, la politique du SYTRAL intègre le fait que la qualité de l'air devient un enjeu de santé publique. En 2009, plus de la moitié des lyonnais était exposées à des valeurs supérieures aux limites recommandées pour le dioxyde d'azote et plus du quart pour les particules fines. Or, le transport est la première source d'émissions de dioxyde d'azote (plus de 30 % des émissions) et de monoxyde de carbone ; il est responsable des trois quarts des émissions de particules fines. Le réseau de transports en commun lyonnais (TCL), compte tenu du fait que le mode électrique est prédominant, est relativement peu polluant : avec environ 17 % de part de marché (de part modale), il ne représente que 2 à 3 % des émissions polluantes. Il reste néanmoins des marges de progrès.

### 1.3. Les leviers d'action

Les moyens dont dispose une autorité organisatrice de transports pour parvenir à consommer moins d'énergie, dépolluer et décarboner ces transports concernent des échelles très diffé-

rentes. Certains portent sur le long terme, d'autres sur le court terme ; certains sont à l'échelle du territoire de l'agglomération, tandis que d'autres concernent simplement le patrimoine du SYTRAL et le comportement de son exploitant. Certains des moyens à mettre en œuvre sont très coûteux, tandis que d'autres sont au contraire générateurs d'économies ; certains ressortissent à des innovations technologiques, d'autres à des solutions organisationnelles. Mais c'est bien l'ensemble de ces moyens que doit mettre en œuvre la collectivité publique pour parvenir à atteindre ses objectifs de dépollution. On verra ensuite les contraintes que l'on rencontre pour atteindre ces objectifs.

À l'échelle de l'agglomération, le premier moyen c'est d'agir sur la planification urbaine. Ainsi, le schéma de cohérence territoriale de l'agglomération prévoit que 70 % des 150 000 nouveaux logements qui seront construits d'ici 2030 devront l'être dans des zones déjà urbanisées. Il impose également que toutes les nouvelles zones ouvertes à l'urbanisation soient préalablement desservies par les transports en commun, qu'il s'agisse du train, des lignes régionales ou des transports en commun urbains. Les moyens dont dispose une autorité organisatrice de transports, c'est de privilégier les modes de déplacement non polluants, donc la marche et l'utilisation du vélo notamment, de favoriser l'usage des transports en commun, de réduire l'impact de ces transports sur l'environnement, et

puis à une échelle beaucoup plus locale, d'impulser une politique d'économie d'énergie auprès de son exploitant.

Favoriser l'usage des transports en commun, cela veut dire développer et optimiser l'offre de transport, améliorer l'attractivité du réseau, développer le maillage, améliorer l'information de la clientèle. À ce titre par exemple, le SYTRAL a développé un navigateur pour Smartphones, un système d'alertes SMS, pour que les clients connaissent les perturbations du réseau, un système d'information par téléphone, la vente de titres sur Internet. Tout ceci contribue à développer l'attractivité du réseau.

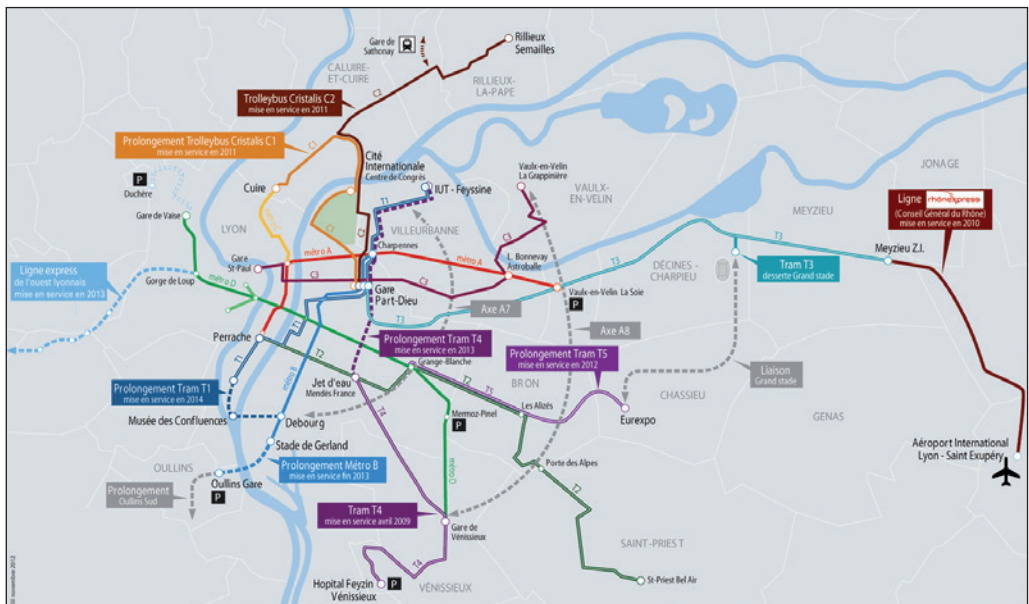
Favoriser l'usage des transports en commun, c'est également augmenter la capacité de ce réseau, augmenter la capacité du matériel roulant, donc acheter des bus articulés, des tramways qui font

désormais 40 m au lieu de 30, allonger les métros en heure de pointe en accouplant deux trains par exemple ; c'est également aménager l'intérieur des métros. C'est encore, grâce à des systèmes de pilotage automatique, automatiser deux nouvelles lignes du réseau lyonnais pour augmenter la fréquence des métros.

Les projets du SYTRAL sur la période 2008-2014 sont de différentes natures. Ils sont constitués de l'extension de nouvelles lignes de métro ou de lignes de trolleybus (lignes C1 et C2 sur la **Figure 6**) ou de tramway, du prolongement du tramway T1 à Debourg, de la création d'une nouvelle ligne T5 qui desservira le centre d'exposition et de congrès d'EUREXPO, ainsi que des prolongements de lignes de métro dont le prolongement de la ligne B pour desservir tout le sud-ouest de l'agglomération (**Figure 6**).

**Figure 6**

Représentation des avancées du réseau lyonnais ; développement de l'offre de transports.  
Dépenses investissements 2008-2014 : 342 M€, dépenses investissements récurrents : 292,3 M€.



La connection de l'agglomération avec ce qu'on appelle à Lyon la Confluence fournit un exemple de lien entre l'urbanisme et les transports (Figure 7). La Confluence était jusqu'à présent desservie par le métro et le tramway mais uniquement par le nord ; le prolongement de la ligne de tramway T1 au sud permet de la desservir par le sud et également de la relier au métro.

Quant au prolongement de la ligne B de métro (Figure 8), il permettra de supprimer 15 500 voitures chaque jour sur les routes de l'agglomération, et donc d'économiser en une année 4 000 tonnes de CO<sub>2</sub>.

Améliorer l'offre de transports implique encore de nombreuses autres actions comme celle de donner la priorité aux bus sur les voitures, ce qui permet de leur faire gagner du temps de parcours, et incidemment aussi de réduire leur consommation énergétique en diminuant le nombre de démarrage, ou encore celle de réaménager l'intérieur des rames de métro. On voit sur ce point le résultat d'un changement d'aménagement intérieur des rames de métro qui a permis de gagner 12 % de capacité (Figure 9).

S'il y a lieu, pour réduire l'impact environnemental des



Figure 7

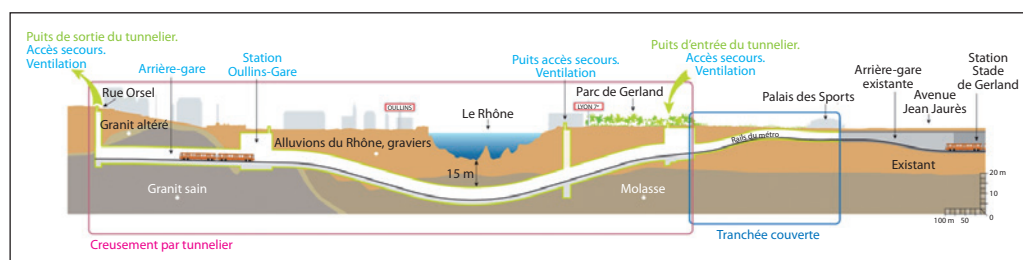
Photographie de la Confluence à Lyon, espace à rendre plus accessible en transports.

transports, d'inciter les usagers de la voiture à faire le choix des transports en commun par les moyens incitatifs cités ci-dessus, il faut aussi en parallèle améliorer les performances des transports en commun eux mêmes.

Ainsi, on doit chercher à développer l'utilisation de matériels et d'infrastructures plus économes en énergie. Concernant le métro par exemple, nous cherchons à optimiser son exploitation en aménageant les horaires pour avoir en même temps à peu près autant de métros qui démarrent que de métros qui freinent, ce qui nous permet de récupérer l'énergie de freinage pour la fournir aux métros qui sont en phase de démarrage. Le SYTRAL a également aménagé

Figure 8

Prolongement de la ligne B : développement de l'offre et diminution du nombre de voitures. Distance : prolongement de 1,8 km de ligne dont 300 mètres en sous-fluvial ; Coût prévisionnel : 222 M€ ; Temps de parcours : moins de 15 min entre la gare d'Oullins/Part-Dieu (soit 5 km) ; Fréquentation : 135 000 voyageurs/jour actuellement sur la ligne. Grace au prolongement du métro B, 15 500 voitures circuleront en moins chaque jour sur les routes de l'agglomération (soit 4 000 tonnes de CO<sub>2</sub> en moins chaque année).





**Figure 9**

*Augmentation de la capacité de 12 % des rames de métro grâce à leur réaménagement intérieur : A) avant ; B) après.*

le programme de pilotage automatique pour que le métro consomme le moins possible d'énergie, et enfin, il essaye de faire optimiser les batteries pour permettre, même si ce n'est pas directement lié à l'économie d'énergie, à des métros dont l'alimentation serait coupée, de pouvoir arriver à la prochaine station pour faire sortir les voyageurs. Pour le tramway, réduire l'impact environnemental, cela veut dire récupérer l'énergie de freinage à l'aide de super-capacités pour pouvoir la rendre au démarrage.

D'autres projets destinés à réduire la consommation énergétique concernent l'interconnexion des réseaux d'énergie métro et tramway, tramway et trolleybus. Un autre projet est de relier le

métro à l'usine d'incinération d'ordures ménagères, ce qui permettra de bénéficier de l'électricité produite par cette usine. Enfin, nous testons des bus *hybrides*. Nous en avons testés l'année dernière pendant un mois et avons constaté qu'en fonction des différentes lignes, les lignes rapides, les lignes chargées, les lignes en pente, ces bus hybrides permettent d'économiser environ 20 % de l'énergie. Nous allons maintenant les tester, pendant plus d'une année, pour voir quelles sont les contraintes de fonctionnement et de maintenance de ces véhicules.

Dernier moyen à citer ici par lequel le SYTRAL agit sur la réduction de la consommation énergétique : imposer à son exploitant délégataire une utilisation toujours plus économe de l'énergie. Plus précisément, il lui est demandé de réduire sa consommation de gasoil de quatre millions de litres sur les six années du contrat de délégation de service public par un suivi et une analyse, et par une assistance et une formation des conducteurs à la conduite rationnelle. Également, il doit réduire de 28 millions de kWh la consommation d'électricité et de gaz de ses sites en améliorant l'éclairage et la performance énergétique des bâtiments, ainsi que réduire d'autre part sa consommation d'eau – essentiellement destinée à l'arrosage des espaces verts et au lavage des véhicules.

La principale contrainte d'une autorité organisatrice est la nécessité de coordonner les différents acteurs et parties prenantes à la question des transports. Le SYTRAL ne



parviendra pas seul à décarboner et dépolluer les transports urbains. Il doit agir en synergie avec les autres collectivités qui sont en charge de la politique de stationnement et des infrastructures routières. Il doit également intervenir auprès de son exploitant, et enfin utiliser les innovations scientifiques que développent les chercheurs et les industriels. Ces innovations doivent être compatibles avec les contraintes liées à l'exploitation, à la sécurité des voyageurs. Elles doivent également être suffisamment fiables et faciles à maintenir pour pouvoir être déployées sur un réseau de transport. Enfin, puisque le transport de voyageurs est une activité déficitaire par nature, nous sommes très attentifs au coût des innovations, à la fois coûts d'investissement et coûts de fonctionnement.

#### 1.4. Conclusion

Il faut rappeler fortement que les collectivités ont une volonté très forte de décarboner et dépolluer les transports, et mènent pour cela une politique d'ensemble. Le rôle des scientifiques et des industriels pour proposer des innovations qui contribueront à atteindre ces objectifs est évidemment primordial, et le SYTRAL est prêt pour cela à mettre à disposition son réseau pour faire des expérimentations grandeur nature. En retour, il est indispensable que soit prise en compte la manière dont on peut utiliser ces technologies ainsi que les contraintes liées aux missions de service public afin qu'elles puissent réellement être mises en œuvre.

## 2 Les apports de la chimie dans les projets d'avenir

Par Henri Van Damme

La France s'est dotée, au 1<sup>er</sup> janvier 2011, d'un organisme de recherche, l'IFSTTAR, consacré aux sciences et technologies des transports, de l'aménagement et des réseaux. Le premier paragraphe de son décret de création est sans ambiguïté sur les ambitions de sa mission puisque l'Institut est chargé de « *réaliser, piloter, de faire effectuer et d'évaluer des recherches, des développements et des innovations dans les domaines du génie urbain, du génie civil et des matériaux de construction, des risques naturels, de la mobilité des personnes et des biens, des systèmes et des moyens de transport et de leur sécurité, des infrastructures, de leurs usages et de leurs impacts, considérés des points de vue de leurs performances techniques, économiques, sociales, énergétiques, sanitaires et environnementales* ». Au-delà du domaine d'intervention, c'est le caractère multidisciplinaire du projet qui frappe, puisqu'il s'agit d'allier les approches de l'ingénieur, du physicien et du chimiste à celles de l'épidémiologiste, du psychologue, du sociologue, de l'économiste, de l'ergonome...

L'importance de l'effort ainsi affecté à la question des transports montre que la puissance publique a compris que cette question conditionne et, certainement conditionnera de plus en plus, la vie de nos sociétés. Les grands objectifs sont de permettre le développement

des transports en respectant les principes du **développement durable**, c'est-à-dire en maîtrisant leur sécurité (nombre des victimes), leur consommation en énergie – puisque celle-ci devient toujours plus précieuse – et leurs émissions chimiques, en particulier en gaz carbonique, facteur majeur du réchauffement climatique.

D'autres chapitres de ce livre s'intéressent directement aux véhicules et aux perspectives sur la nature de l'énergie qui les mettra en mouvement. Le présent chapitre porte sur la question des infrastructures qui permettent l'usage des véhicules – un aspect souvent méconnu mais cependant d'une importance capitale. Elles sont longues et coûteuses à construire et engagent profondément les modes de vie des habitants des décennies futures.

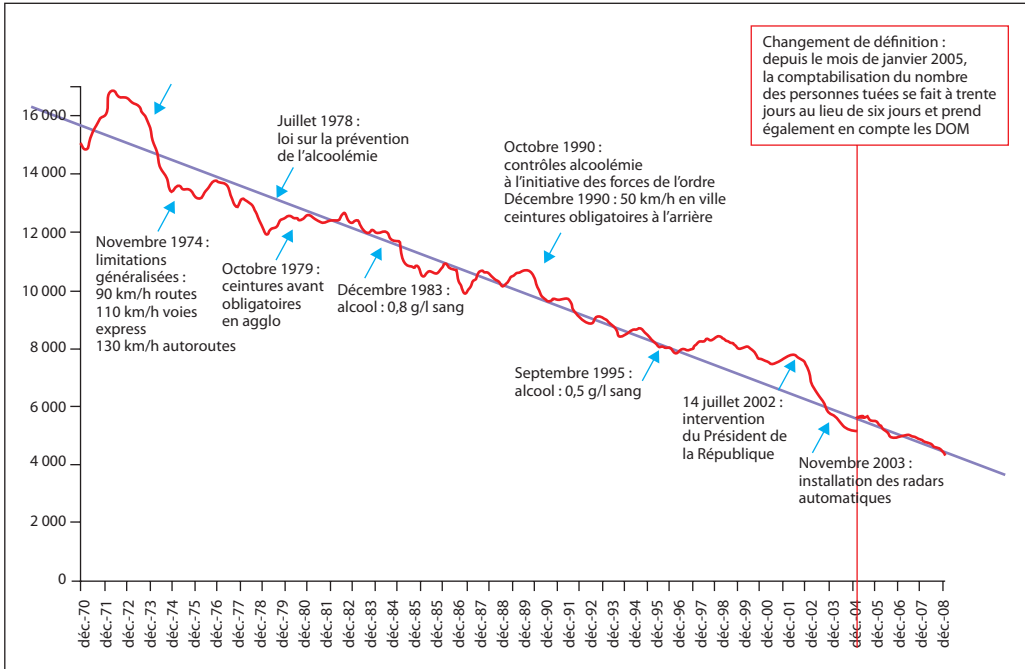
### 2.1. Une mobilité en forte évolution

Avant d'aborder spécifiquement la question des infrastructures de transport, il est utile de jeter un regard général sur l'évolution de la mobilité. La notion de mobilité recouvre deux réalités assez différentes l'une de l'autre. La première est celle des départs en vacances, des week-ends ou, plus généralement, des activités de loisirs et de découverte. C'est la mobilité dite « choisie », désormais considérée comme un droit. La seconde est celle des déplacements liés, directement ou indirectement, aux activités professionnelles. C'est la mobilité dite « contrainte », un terme qui décrit bien la

manière dont elle est vécue. Les modes de transport utilisés pour ces deux types de mobilité peuvent être très différents selon les situations mais, globalement, en termes de kilomètres parcourus par individu, c'est l'automobile qui domine encore largement les déplacements dans notre pays. C'est aussi l'automobile qui a l'impact énergétique, environnemental et sanitaire le plus fort. Maîtriser cette mobilité automobile est donc un objectif prioritaire avec comme priorité parmi les priorités, la **sécurité**. La **Figure 10** illustre les progrès réalisés dans le domaine. Malgré les fluctuations, la tendance est clairement à une diminution quasi linéaire du nombre d'accidents mortels. Cela suggère que la diminution observée ne résulte pas d'un moyen technique particulier (conception de l'habitacle, ceintures de sécurité, airbags, ABS, radars, etc.) mais de la combinaison de tous et, probablement plus que tout autre facteur, du changement de comportement des conducteurs.

Les contraintes auxquelles nous devons faire face nous conduisent aussi à réfléchir à l'évolution de nos façons d'envisager les transports de personnes. Ainsi, il est clair que nous pratiquons de plus en plus l'**autopartage**<sup>3</sup>, utilisons

3. Autopartage : plutôt que de disposer d'une voiture personnelle qui reste l'essentiel de son temps au garage ou sur une place de stationnement, l'utilisateur d'un service d'autopartage dispose d'une voiture qu'il ne finance que pour la durée de son besoin. Le reste du temps, la voiture est utilisée par d'autres membres (voir Autolib' à Paris).



de plus en plus les transports en commun et recourrons de plus en plus à la multimodalité. Mais la marge de progrès est encore énorme. Par exemple la totalité des trajets en autopartage en France dépasse à peine celle de certaines villes comme des villes d'Europe du Nord ou comme la ville d'Austin au Texas, qui a mis en place un système d'offre et un modèle économique très attractif.

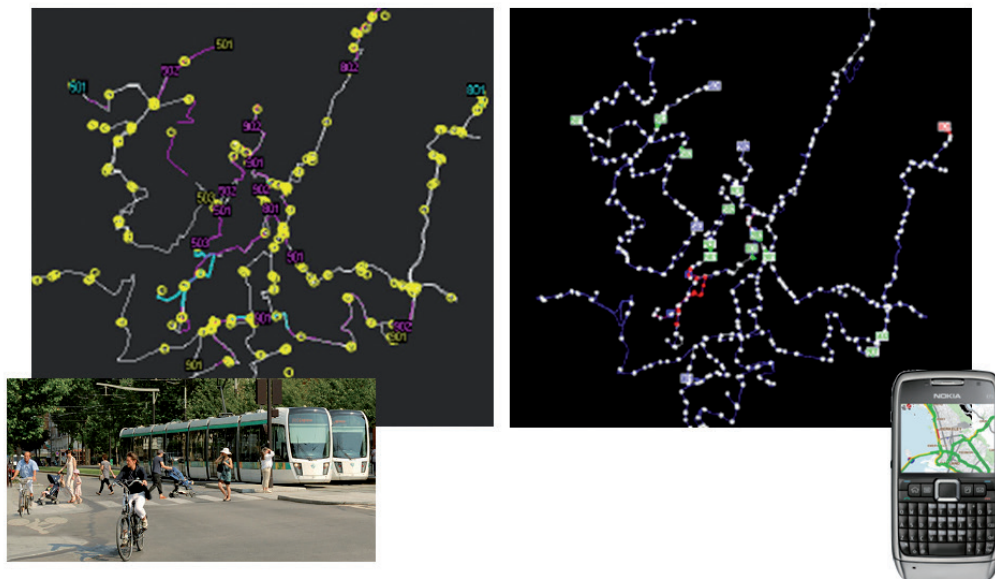
Une autre évidence est notre retard dans l'usage des deux roues et principalement des modes « doux », ceux dans lesquels la puissance motrice est celle des muscles, en particulier la marche et le vélo. Par ailleurs, on peut s'attendre à une diversification, une multiplication des types de véhicules. Pensons par exemple à la mise sur le marché récente par Renault

de la TWIZY, véhicule qu'on n'aurait pas facilement imaginé il y a quelques années, ou encore des gyropodes (associés pour l'instant à la marque Segway), véhicules très techniques mais à la conduite très intuitive.

Des évolutions importantes mais peut-être mal connues marquent aussi les techniques de **gestion du trafic** – trafic routier et aussi trafic ferroviaire. Les technologies de l'information et de la communication (TIC) sont, bien entendu, les technologies reines en la matière (**Figure 11**). Ce qui se développe va bien au-delà de notre Bison Futé national, avec l'introduction de la communication « véhicule-to-véhicule » ou « V2V » et « véhicule-to-infrastructure » ou « V2I ». L'évolution vers ce qui pourrait devenir une conduite totalement automatisée est

**Figure 10**

*Évolution de la courbe de mortalité sur les routes de France au fil des années.*



**Figure 11**

*La gestion du trafic en temps réel fait appel à toutes les technologies de l'information et de la communication.*

en marche. Les diverses aides à la conduite que nous connaissons actuellement sur les véhicules haut de gamme (freinage d'urgence, détecteur de somnolence, parking automatique, etc.) n'en sont que les prémices. La conduite automatisée pourrait notamment augmenter notablement la capacité des autoroutes tout en réduisant la consommation, grâce à la réduction – en toute sécurité – de la distance entre véhicules, en particulier entre poids lourds.

Dernier mode d'action à mettre en œuvre pour échapper à l'aggravation des conditions de transports que nous vivons : il faut généraliser l'organisation de services qui évitent les déplacements, les limitent ou limitent leur impact. Le développement du télétravail, l'offre de lieux de travail flexibles dans les gares et aéroports, et le développement de l'autopartage en sont des exemples.

## 2.2. Les infrastructures de transport : un patrimoine collectif impressionnant

Les infrastructures dont nous disposons en France pour les transports sont impressionnantes (**Figure 12**). Notre pays compte environ 7 000 km d'autoroutes et 12 000 km de routes nationales. Le réseau de routes départementales et communales – dit « réseau secondaire » – avoisine, pour sa part, le million de km. Le réseau ferré de lignes à grande vitesse (LGV) approche désormais les 2 000 km, tandis que le réseau ferroviaire électrifié classique avoisine les 15 000 km. Ces infrastructures linéaires s'enchevêtrent grâce à 230 000 ponts routiers et 50 000 ponts ferroviaires. Elles requièrent plus de 50 000 murs de soutènement et sont rendues plus directes grâce au percement de près de 1 000 km de tunnels, routiers ou ferroviaires.

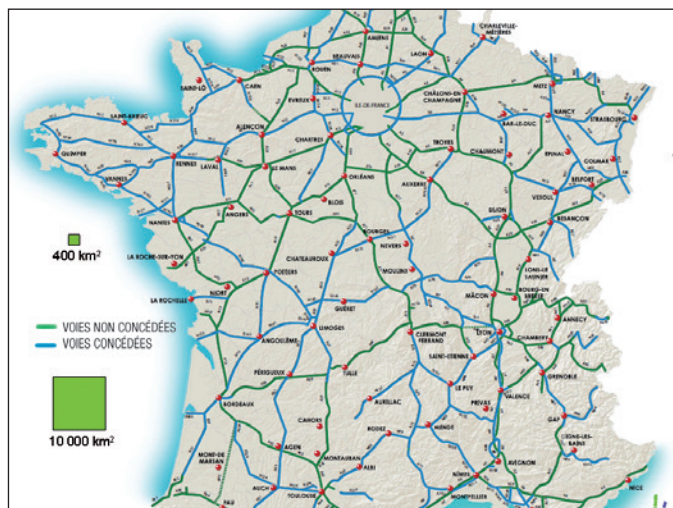


Figure 12

Le réseau autoroutier et le réseau routier national. Ensemble, ils représentent une surface de 400 km<sup>2</sup> environ (le petit carré vert). L'ensemble du réseau routier représente une surface de 10 000 km<sup>2</sup> environ (le grand carré vert).

Tout ceci coûte cher. Le réseau national à lui seul représente un patrimoine estimé à 140 milliards d'euros. Le coût moyen de construction d'un kilomètre de chaussée à quatre voies est d'une vingtaine de millions d'euros. Et que dire alors de la valeur du million de kilomètres existant à l'heure actuelle ! Les infrastructures de transport guidé (sur rail) coûtent cher, elles aussi, en particulier les tramways urbains qui se multiplient mais ne représentent pour l'instant que 600 km de voies, environ. Leur coût de construction est également de l'ordre de 20 millions d'euros du kilomètre. Pour maintenir tout ce patrimoine, il faut l'ausculter en permanence pour connaître son état de service, avec des interventions humaines ou, de plus en plus, une surveillance automatisée grâce à l'installation de micro et de nanocapteurs massivement distribués dans l'infrastructure et connectés en permanence à des centrales de surveillance.

### 2.2.1. L'apport de la science des matériaux

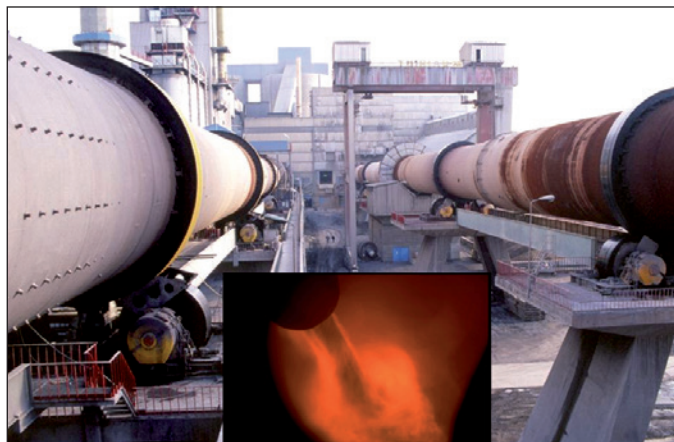
Les infrastructures de transport sont pour la plupart construites avec deux matériaux-rois qui se trouvent être deux bétons (on doit y rajouter l'acier, à un degré moindre). Le premier est le béton, que nous appelons tous ainsi et qu'il serait plus juste d'appeler le béton de ciment. Un béton est un mélange de cailloux – ou, en termes plus techniques, de granulats – et d'une colle qui assure la cohésion de l'ensemble<sup>4</sup>. Dans le béton classique, la colle est du ciment Portland, qui doit son nom aux chercheurs du XIX<sup>e</sup> siècle qui mirent au point son procédé de fabrication et qui notèrent la similitude de sa couleur avec celle des roches de la côte anglaise. Le ciment Portland est un matériau du feu. Sa fabrication, par

4. Au sujet du béton, voir *La chimie et l'habitat*, Chapitre de J. Méhu, coordonné par M.-T. Dinh-Audouin, D. Olivier et P. Rigny, EDP Sciences, 2011.

calcination à plus de 1 400 °C d'un mélange d'argile et de calcaire, fait partie des arts du feu au même titre que celle de la céramique (**Figure 13**). Elle est très énergivore et libère environ 800 kilos de CO<sub>2</sub> par tonne de ciment, pour partie par décarbonatation du calcaire et pour partie pour le chauffage du four (la fabrication du ciment représente entre 5 et 6 % des émissions mondiales de CO<sub>2</sub> !). Améliorer le bilan carbone du ciment est donc un objectif qui devrait stimuler bon nombre de chimistes. Il y a en effet place pour que cette énergie de fabrication soit utilisée plus efficacement. La réaction du ciment avec l'eau produit en effet un silicate de calcium hydraté extrêmement divisé sous forme de nanoparticules, mais avec des liaisons très fortes au sein et entre nanoparticules. Or, d'après les études les plus récentes, nous n'utilisons que moins de 15 % de la « capacité mécanique » des liaisons que l'on pourrait théoriquement mobiliser dans ce nanomatériau. La marge de progrès est donc grande.

### Figure 13

La fabrication du ciment Portland reste une opération énergivore et émettrice de gaz carbonique, malgré les progrès réalisés.

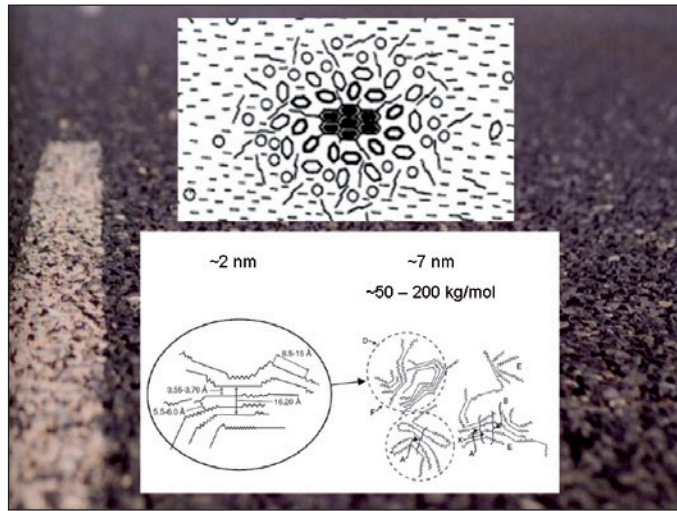


Mais cette marge de progrès résiduel très importante ne saurait occulter le fait que le béton de ciment Portland a déjà fait d'énormes progrès. Pour partie grâce à la physique des milieux granulaires, qui a permis d'améliorer la compacité de l'empilement granulaire qui constitue en quelque sorte le squelette du béton. Pour partie aussi grâce aux progrès de la mécanique du renforcement, par un ferrailage classique ou par des fibres courtes. Et pour une grande partie enfin, grâce aux progrès dans le domaine de la chimie de surface du ciment et de ses interactions avec les polymères. L'utilisation de ces polymères, à la structure très « pointue », à doses quasi-homéopathiques, est désormais indispensable. Elle permet d'éviter la floculation des grains (la formation de grumeaux) dans le béton « frais », avant que la réaction avec l'eau ne débute. Cette floculation ruinerait tous les efforts pour obtenir des empilements plus compacts. C'est donc grâce aux polymères défloculants que l'on peut désormais formuler des bétons qui, tout en étant très compacts – et donc très résistants après prise –, restent malgré tout très fluides à l'état frais. Pris ensemble, ces progrès ont permis de réaliser, en béton, des ouvrages d'art qui, il y a peu, n'auraient pu être construits qu'en acier.

Le deuxième béton, que nous connaissons tous, c'est le béton bitumineux, que les professionnels de la route appellent « enrobés bitumineux ». La colle y est le bitume, résidu de distillation

du pétrole sous vide dont on produit des quantités considérables, quatre millions de tonnes par an. Le bitume est un produit lourd et visqueux qui, contrairement à ce qu'un chimiste averti mais non spécialiste pourrait penser, ne s'apparente pas à un polymère ou une solution de polymère, mais plutôt à une solution micellaire de molécules hétérogènes, polyaromatiques mais pas seulement, et relativement polaires qu'on appelle les asphaltènes. La **Figure 14** illustre schématiquement la structure du bitume : de très grosses molécules, symbolisées par quelques noyaux polyaromatiques, au centre, entourées de molécules plus petites qui baignent dans un milieu fluide. En fonction des rapports des différentes phases, on a affaire à un bitume plus ou moins dur ou plus ou moins visqueux. C'est un milieu extrêmement complexe dont on n'a pas fini de comprendre la constitution et sa formulation, pour l'adapter à chaque utilisation, devient de plus en plus sophistiquée. Le bitume est en effet rarement utilisé à l'état pur, mais le plus souvent en mélange avec des additifs tensioactifs, des agents émulsifiants ou des polymères, éventuellement réticulés. La formulation des bitumes est un terrain de jeu fabuleux pour le chimiste, en particulier lorsqu'il est utilisé sous forme d'émulsion.

Une note de prospective : à long (ou très long) terme, dans une société post-carbone fossile, le bitume pourrait bien suivre les mêmes traces que les carburants. En d'autres termes, ce produit actuelle-

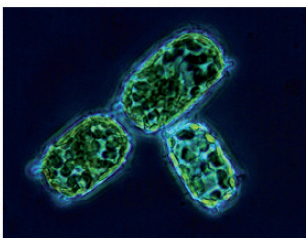
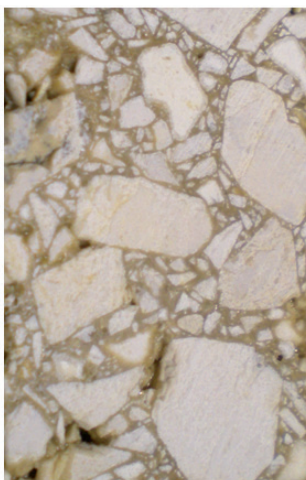
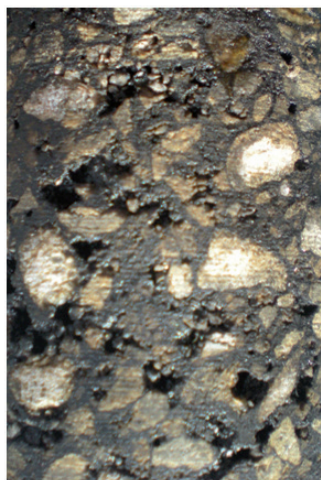


**Figure 14**

*Schéma de la structure du bitume, avec des agrégats de grosses molécules polyaromatiques (les asphaltènes) formant des micelles dans un milieu fluide de molécules plus petites.*

ment ex-pétrole pourrait bien un jour être remplacé par un bitume bio-sourcé, issus de plantes ou de microalgues. Cela n'est pas une utopie. Des produits bitumeux issus de matières premières végétales sont déjà sur le marché et d'autres, issus de microalgues sont à l'étude. Ces produits ne sont pas encore économiquement compétitifs, malgré la hausse du prix du pétrole, mais ils permettent déjà de faire des enrobés possédant des propriétés mécaniques comparables à celles des enrobés bitumineux classiques, qui plus est avec une matrice qui est transparente (**Figure 15**).

Les matériaux pour la construction des infrastructures de transport ne se limitent pas aux bétons, malgré leur importance dominante. On voit de plus en plus, mais encore timidement, apparaître des matériaux provenant de domaines considérés comme plus nobles, comme l'aéronautique. Il s'agit des composites polymère-fibres.



**Figure 15**

Enrobés préparés avec du bitume ex-pétrole (à gauche) ou avec un « bitume » ex-végétal (à droite). Dans le futur, la source végétale (en bas, à gauche) pourra être remplacée par une source alguaire (en bas, à droite).

Jusqu'à présent, ils n'étaient utilisés que pour réparer des ouvrages endommagés (par collage d'emplâtres, comme dans la réparation des coques de navires de plaisance). Ils sont désormais utilisés pour construire des passerelles piétonnes ou pour des véhicules légers comme les deux roues, et ils pourraient bientôt être utilisés pour construire de véritables ponts pour véhicules plus lourds. La **Figure 16** illustre ainsi une poutrelle en composite polymère – fibre de verre. Avec des éléments semblables a été construit un démonstrateur dans lequel les poutres sont instrumentées avec divers capteurs – acoustiques, optiques ou électromagnétiques – qui auscultent en permanence l'état de santé de la structure, à l'instar de ce qui se fait dans les avions

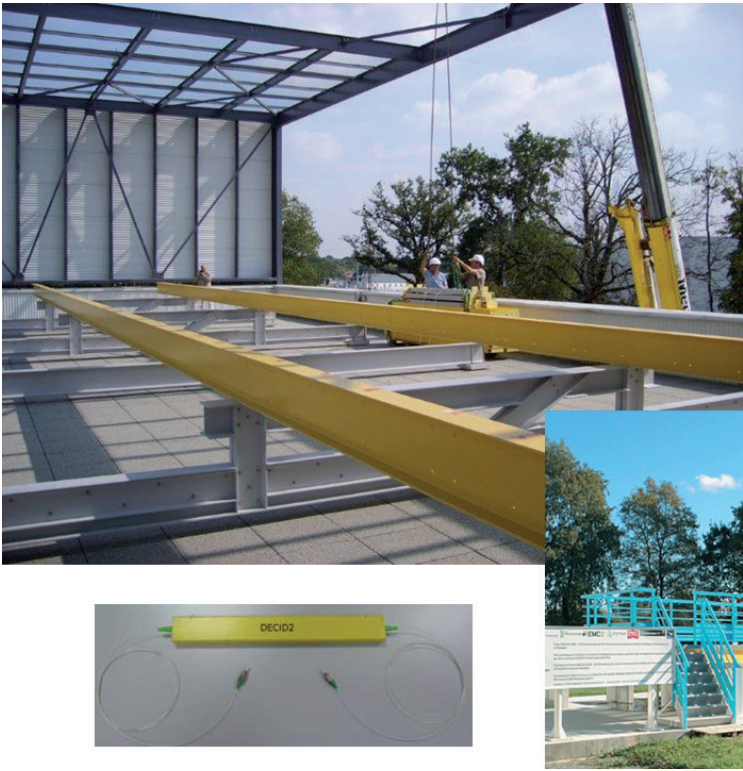
les plus récents tels le 787 de Boeing ou l'A350 d'Airbus.

L'utilisation de matériaux de plus en plus techniques pour les infrastructures sollicite les chimistes non seulement pour les étapes de conception et de formulation, mais aussi pour l'étape de fabrication industrielle. La complexité croissante va en effet de pair avec un contrôle de plus en plus fin du procédé de fabrication. Le chimiste a évidemment un rôle primordial à jouer dans ce travail de génie des procédés.

### 2.2.2. Le développement durable et la gestion des infrastructures

Le développement durable n'est pas qu'une affaire de bilan carbone. C'est aussi la prise en compte du mot « durable » dans son sens premier : ce qui résiste à l'épreuve du temps. Il s'agit donc d'assurer la plus grande durée de vie possible aux infrastructures, en bon état de service. On parle plutôt de durabilité. Et dans cette perspective aussi, la chimie occupe une place primordiale. Il suffit parfois de quelques impuretés dans les cailloux (« granulats ») utilisés pour fabriquer un béton pour voir apparaître au bout de quelques années des « maladies » (**Figure 17**) qui peuvent en quelques années conduire à la ruine de l'édifice. Il y a eu des exemples spectaculaires, en France et ailleurs, où des ponts ou des tunnels ont dû être fermés à la circulation quelques années après leur construction à la suite de dégradations subies par l'ouvrage. Le plus souvent,





**Figure 16**

*Ces poutrelles ne sont pas en acier mais en matériaux composites. Elles ont permis de construire la passerelle expérimentale visible à droite. L'ouvrage est équipé dans la masse de capteurs optiques et ultrasonores capables de l'ausculter en permanence.*

ces « maladies » sont liées à la présence ou l'apparition de minéraux amorphes ou cristallisés inhabituels, dont la croissance provoque des phénomènes de gonflement, suite à une modification des conditions thermodynamiques (composition, température).

Les enrobés bitumineux ne sont pas à l'abri de tels désordres. En particulier, la présence d'argiles hydrophiles et « gonflantes » à la surface des granulats peut entraîner une perte d'adhésion à l'interface du granulat et du bitume en conditions humides. Tous ces désordres font l'objet d'études de laboratoire en conditions contrôlées, d'études théoriques et, dans le cas des matériaux de la route, de

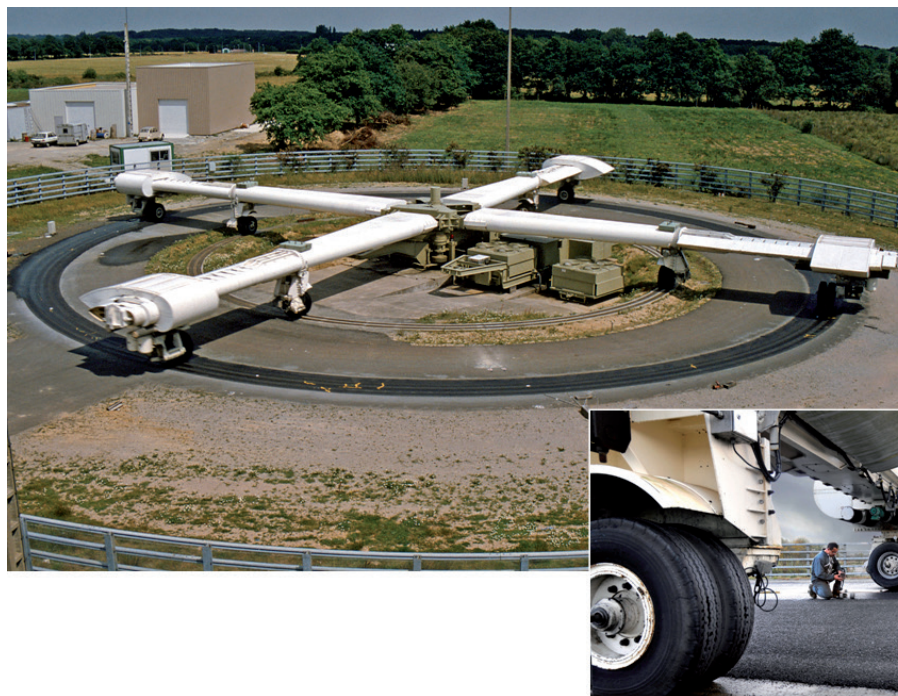
tests sur des « manèges de fatigue » (Figure 18).

Une autre facette du développement durable est le recyclage, une tâche pour laquelle notre système de gestion des infrastructures de transports

**Figure 17**

*État de surface d'un béton atteint d'un désordre chimique dû à la croissance de minéraux sulfatés.*





**Figure 18**

*Manège de fatigue utilisé pour les tests de résistance de matériaux routiers en conditions quasi-réelles.*

ou, plus généralement, notre système de construction est encore bien peu performant. Un exemple : l'Île-de-France importe annuellement environ dix millions de tonnes de granulats destinés à la construction d'infrastructures ou de bâtiments. Dans le même temps, elle exporte neuf millions de tonnes de gravats contenant une bonne proportion de granulats. Donc pour un résultat net d'importation d'un million de tonnes, on a transporté dix-neuf millions de tonnes. Les enrobés bitumineux fournissent un autre exemple : alors que le Japon les recycle à plus de 90 %, la France ne le fait encore qu'à moins de 50 %, et encore ce recyclage n'en est-il pas vraiment un car les couches superficielles, les plus « nobles », sont souvent réutilisées comme simple

matériau de remplissage. On doit viser le véritable recyclage, qui consiste à réutiliser pour la même fonction, en le régénérant, le matériau qu'on a détruit.

Toujours dans le cadre de la politique de développement durable, il faut maîtriser l'impact des transports et, en particulier, de leurs infrastructures sur l'environnement. Nous rêvons tous d'une ville dans laquelle, malgré la densité d'habitat et d'infrastructures et toutes les commodités que cette densité apporte, la nature serait le premier environnement palpable. On sait bien pourtant que ces éléments sont difficilement compatibles !

La pratique de l'**étude du cycle de vie** – analyse désormais classique dans le domaine des matériaux et des

ressources minérales, et la chimie y est largement sollicitée – s'est ainsi imposée dans le domaine des infrastructures également. Mais pour être pertinente dans ce cas, elle doit être considérablement généralisée. Il ne s'agit plus seulement de chiffrer le bilan des émissions et de la consommation en matière et en énergie de l'objet lui-même et de ses constituants, comme par exemple les rails, le ballast, les caténaires dans le cas d'une ligne ferroviaire. Pour être pertinente, l'analyse doit inclure des éléments tels que sa construction, y compris le terrassement, l'impact de la ligne sur l'environnement et la biodiversité, le développement de l'habitat, la valeur foncière, les pratiques de mobilité, la mixité sociale, etc. Et ces éléments sont beaucoup plus difficiles à chiffrer que les précédents, qui plus est sur une base commune.

### 2.3. Inventer des routes intelligentes pour l'aménagement d'un territoire économe

À grande échelle, la question des infrastructures de transport est intimement liée à l'aménagement du territoire. Celui-ci doit tenir compte des modes et des pratiques de transport mais, inversement, il les conditionne. La question de la ville, déjà évoquée plus haut, fournit une bonne illustration de cette interdépendance. On la veut durable, mêlée à la nature mais on veut aussi avoir un accès facile et rapide à tous les biens et services urbains. On la veut facile à vivre, **frugale**

(énergétiquement peu gourmande) mais aussi de plus en plus connectée à des sources d'information toujours plus nombreuses. Tout ceci n'est pas facile à concilier et le problème ne cessera de se poser à nouveau à chaque génération.

Contrairement aux idées reçues, l'introduction massive de l'e-commerce (commande des biens par Internet) ne fait pas décroître la demande en transports. On observe en fait une tendance à la multiplication des déplacements. La tendance de fond est une diminution de la taille des colis et leur multiplication – simplement, ce ne sont pas les mêmes qui se déplacent. Et quand on sait dans quelle mesure la congestion des villes est due à la livraison des biens, on réalise qu'il y a un vrai problème. Une remarque aggravante : l'évolution globale ne va pas dans le bon sens, puisqu'au niveau mondial, dans les dix dernières années, le transport par rail est en baisse, le transport par route a augmenté de plus de 50 %, le transport maritime de plus 63 et l'aérien de plus 75... Toujours est-il qu'il y a bien une question sur laquelle des progrès énormes sont à faire, c'est celle des transports de marchandises en milieu (méga)urbain – la logistique urbaine pour faire court.

Par ailleurs, pour ses déplacements personnels et, en particulier, pour sa mobilité dite « choisie », Le citoyen du XXI<sup>e</sup> siècle aime toujours la voiture malgré les difficultés, même si certaines populations urbaines, jeunes en particulier, semblent s'en

détourner. Elle le fait rêver et les progrès techniques font entrevoir de multiples voies d'évolution qui entretiennent ses rêves et ses fantasmes.

Par un peu de prospective, nous aimerions maintenant ré-équilibrer le relatif désintérêt dont souffre le grand public, en comparaison des véhicules et de l'organisation même des transports, le « support de notre mobilité » que constitue la route, à propos desquels on peut avoir l'impression – de loin – qu'il n'y a pas grand-chose qui se passe. La route est actuellement perçue comme un objet-support passif pour l'objet actif qui est le véhicule dont le conducteur est maître. Pourtant, même déjà actuellement, c'est loin d'être le cas. Le contact pneu-route joue un rôle essentiel dans la sécurité. Une signalisation bien conçue met les sens en éveil. Bien conçue, une chaussée peut aussi jouer un rôle non négligeable dans la réduction des nuisances sonores et dans l'évacuation des eaux pluviales. Par ailleurs, comme le souligne l'Institut

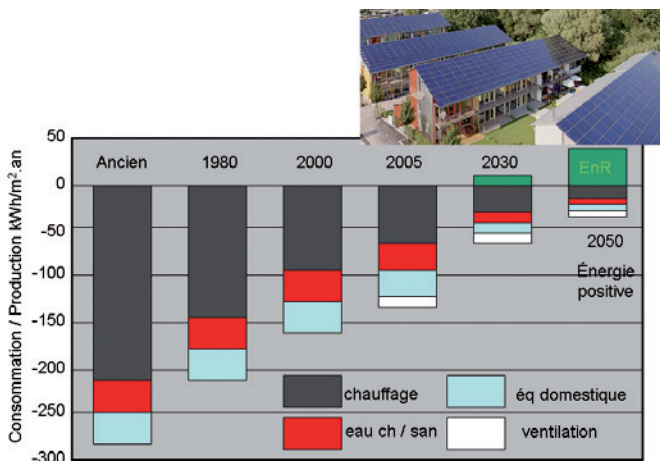
des Rues, des Routes et des Infrastructures de Mobilité (IDRRIM), les rues et les routes constituent toujours le premier réseau social et comme telles, attirent l'attention des chercheurs, ingénieurs, futurologues et prospectivistes.

En réalité, la route amorce une évolution comparable à celle qui se déroule dans le domaine du bâtiment. En quelques années on est passé d'un habitat extrêmement énergivore (en particulier pour le chauffage) à un habitat neuf beaucoup plus sobre, éventuellement même tellement sobre qu'il présente un bilan énergétique nul ou même positif (**Figure 19**) dans la mesure où, équipé de capteurs solaires et/ou éoliens, il pourrait produire plus d'énergie que le peu qu'il consomme. De tels « bâtiments à énergie positive » sont encore exceptionnels en France mais la situation évolue vite. Parallèlement, dans le domaine des TIC, nous vivons l'introduction de la domotique, qui modifie de fond en comble notre manière de gérer l'énergie, le confort, l'approvisionnement, la sécurité et la santé dans l'habitat.

La route peut-elle suivre une évolution comparable ? La réponse est très certainement positive. Dans une vision prospective, on peut imaginer que **la chaussée devienne un objet beaucoup plus « actif »** qu'elle ne l'est aujourd'hui, y compris sur le plan énergétique. Cette route dotée de multiples fonctions est qualifiée de « route de 5<sup>e</sup> génération » ou R5G en France et de « Forever Open Road » ou FOR au niveau européen (**Figure 20**).

Figure 19

Évolution de la consommation énergétique de l'habitat. Au stade où la production d'énergie électrique et thermique devient supérieure à la consommation, l'habitat est qualifié d'habitat « à énergie positive ».



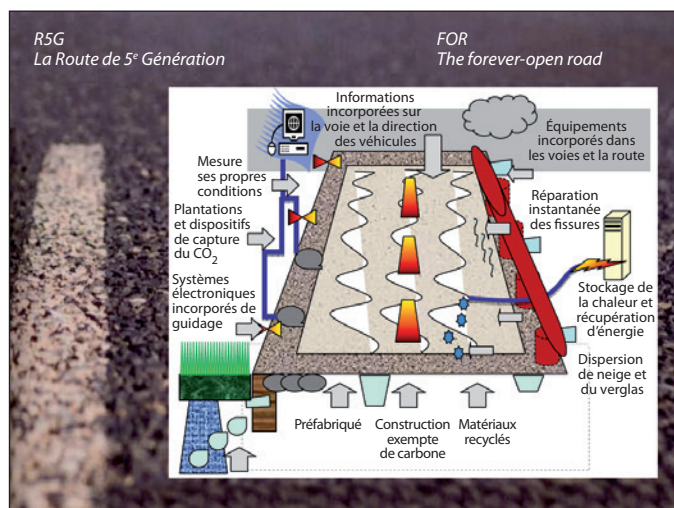


Figure 20

La route de « cinquième génération » sera dotée de multiples fonctionnalités lui donnant un rôle infiniment plus actif que la route d'aujourd'hui.

Un exemple ? On peut imaginer qu'au lieu de laisser se déposer le givre les matins d'hiver, elle conserve une température suffisante pour l'éviter. Ceci pourrait se faire au moyen de capteurs solaires chauffant un circuit d'eau incorporé dans la chaussée, comme cela avait été étudié par le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées<sup>5</sup> (LCPC) il y a déjà de nombreuses années. On pourrait aussi, à l'instar de ce qui se fait parfois dans le bâtiment, mettre en œuvre des « matériaux à changement de phase », qui fondent en consommant leur énergie latente de fusion aux heures de la journée les plus chaudes et la restituent par une re-solidification aux heures les plus froides<sup>6</sup>. Ces

matériaux sont souvent des matériaux très courants et peu sophistiqués, les plus utilisés étant tout simplement de la paraffine ou des sels hydratés. Incorporés dans les chaussées sous forme encapsulée, ils pourraient réduire notablement les risques de verglas ou de givre en condition hivernale.

Un autre exemple est le rôle que la chaussée pourrait jouer – et, de fait, joue déjà – dans la dépollution de l'air. Grâce à un revêtement en béton photocatalytique<sup>7</sup> (béton dopé au dioxyde de titane sous forme anatase) sensible au proche UV solaire, il a été montré que la chaussée peut réduire significativement – de l'ordre de 50 % – la concentration des oxydes d'azote ( $\text{NO}_x$ ), même en conditions de trafic élevé.

5. Le LCPC est un organisme créé en 1949 pour aider à la reconstruction des infrastructures nationales après la dernière guerre. Il a été dissous en 2011 pour intégrer l'IFSTTAR.

6. Voir à ce sujet *La chimie et l'habitat*, Chapitre de J.-C. Bernier, coordonné par M.-T. Dinh-Audouin, D. Olivier et P. Rigny, EDP Sciences, 2011

7. Au sujet de la photocatalyse pour dépolluer l'air, voir *La chimie et l'habitat*, Chapitre de M. Ledoux, coordonné par M.-T. Dinh-Audouin, D. Olivier et P. Rigny, EDP Sciences, 2011.

Qui plus est, le même revêtement contribue à maintenir la surface propre en décomposant certaines salissures organiques.

Parmi toutes les évolutions qui pourraient rendre la chaussée plus active, celles qui concernent l'énergie méritent qu'on les examine de près, compte tenu de l'impact énorme qu'elles pourraient avoir. Une remarque préliminaire s'impose, pour mettre en garde contre certaines idées qui semblent très innovantes mais qui ne résistent pas à un premier examen. C'est notamment le cas de la chaussée piézoélectrique<sup>8</sup> dans laquelle des dispositifs piézoélectriques seraient comprimés au passage des véhicules et produiraient de l'énergie électrique. Un petit raisonnement de thermodynamique indique que si l'on récupère de l'énergie en déformant la chaussée, c'est que l'automobiliste a dépensé (au moins) la même énergie pour la déformer... Où est le gain ?

Dans la même veine, il ne faut pas accepter l'idée, relativement répandue, qu'on économiserait de l'énergie (donc du carburant) en diminuant la rugosité d'une chaussée. En fait c'est faux ou en tout cas négligeable pour une raison simple : c'est que l'échelle de longueur typique de la rugosité d'un revêtement de chaussée est nettement inférieure à celle d'un pneu. De surcroît, le pneu est infiniment plus déformable que la chaus-

sée et c'est lui qui dissipe le plus d'énergie. Par ailleurs, la rugosité reste nécessaire pour assurer l'adhérence du véhicule...

Une troisième idée a été avancée : rendre la route, la chaussée ou la voie ferroviaire capteur **photovoltaïque**. Certains – aux États-Unis – ont fait le pari de développer des modules photovoltaïques suffisamment robustes pour constituer la surface de roulement et permettre le passage des véhicules tout en rendant la chaussée démontable. On peut certes douter que ce soit réaliste, compte tenu des dégâts que causent les poids lourds aux chaussées, mais l'idée est séduisante.

En revanche, un concept qui pourrait se révéler réaliste à long terme, serait de considérer la route comme une surface que l'on couvrirait d'une superstructure légère qu'on pourrait fonctionnaliser. Plusieurs projets sont évoqués (Los Angeles, Grenoble) mais aucune réalisation n'a vu le jour pour l'instant. En revanche, le concept a déjà été mis en œuvre sur voie ferrée. La **Figure 21** illustre un site mixte routier-ferroviaire situé en Belgique. La partie ferroviaire, en tranchée, a été couverte de panneaux photovoltaïques sur une dizaine de kilomètres. Le coût en a été important et l'électricité produite par l'installation n'est pas plus compétitive (hors subventions) que celle produite par des panneaux en toiture de maison individuelle. Mais c'est un beau démonstrateur qui laisse entrevoir que certaines roca-

8. Piézoélectrique : propriété que possèdent certains corps de se polariser électriquement sous l'action d'une contrainte.



Figure 21

Une autoroute urbaine couverte de panneaux photovoltaïques, imaginée par l'architecte-urbaniste suédois Mans Thom.

périurbaines par exemple pourraient bien faire l'objet d'expérimentations comparables dans un proche avenir. Ce qui fait vraiment rêver, c'est l'extrapolation de ceci à l'échelle nationale. Rien qu'en se limitant au réseau autoroutier et au réseau routier national, on dispose d'une surface d'environ 400 km<sup>2</sup>, sans occupation de terres agricoles ni de surface à construire. Couverte de capteurs ayant un rendement de conversion de 10 %, cette surface produirait une puissance crête correspondant à environ 40 GW, soit les deux tiers de toute la puissance nucléaire française... L'énorme réserve foncière de notre réseau ferré pourrait suivre le même chemin, toujours sans achat ni occupation de terrains supplémentaires. On dépasserait alors largement la production électrique totale actuelle (nucléaire hydroélectrique + gaz).

L'étape suivante dans notre marche vers une « **chaussée active** » pourrait être aussi la mise à contribution de la chaussée, non pas pour la production d'énergie électrique, mais pour l'alimentation des véhicules qui l'empruntent, grâce à la technique de l'ali-

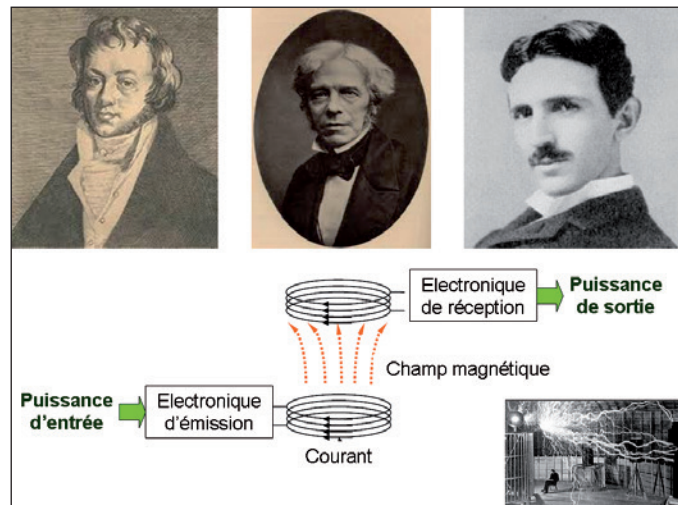
**mentation par induction.**

Des spires primaires (émettrices) seraient noyées dans la chaussée et des spires secondaires (réceptrices) seraient situées sous le plancher du véhicule ; c'est le principe du transformateur, mais sans noyau de fer doux. Les grands anciens de la physique et de la technologie (Ampère, Faraday et Tesla, représentés sur la **Figure 22**) ont développé les bases de cette technique il y a fort longtemps et des brevets ont été pris de longue date (**Figure 23**).

En réalité, la technique est déjà couramment utilisée

Figure 22

Les bases de l'induction posées par Ampère, Faraday et Tesla permettent d'envisager une alimentation électrique des véhicules sans contact, par induction.



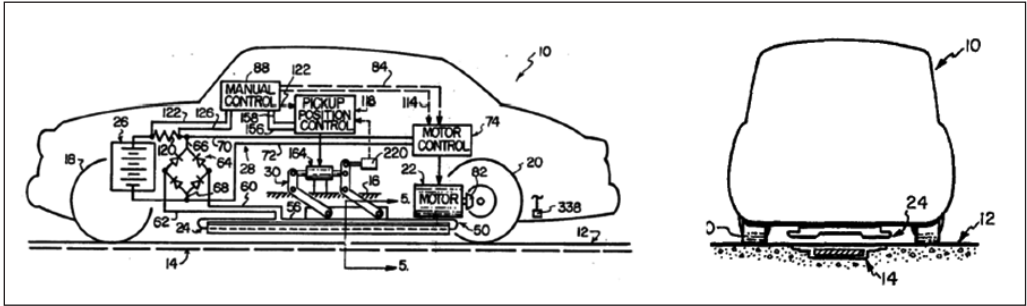


Figure 23

Illustration tirée de l'un des premiers brevets relatifs à l'alimentation par induction pour l'automobile, le brevet US Patent 3914562 de 1975.

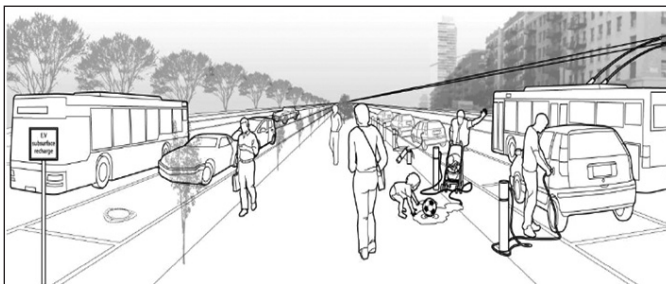
dans les halls de montage des constructeurs d'automobiles, dans un environnement très maîtrisé, il est vrai. Plusieurs lignes d'autobus électriques, notamment en Italie, font appel à cette technologie pour la recharge à l'arrêt, au dépôt.

Les progrès actuels qui permettent des transferts de puissance importants avec des hauteurs au sol de 25 à 30 cm et des rendements de l'ordre de 90 %, ouvrent la voie à l'alimentation rapide des bus à chaque arrêt, ce qui prolonge notablement leur autonomie sans augmenter la taille de la batterie. Pour les véhicules particuliers, on peut imaginer, dans un premier temps, mettre

à profit les arrêts aux feux rouges puis, à plus long terme, alimenter les véhicules de manière dynamique, en cours de circulation, grâce à des émetteurs enfouis dans la chaussée à intervalles réguliers et se déclenchant uniquement lorsque le véhicule est à leur aplomb. Des démonstrateurs ont été réalisés, notamment en Belgique, en Allemagne et en Corée et un programme européen (FABRIC) impliquant la France vient de démarrer. Un des multiples avantages (Figure 24) de cette technologie serait de réduire d'un facteur supérieur à cinq la taille de la batterie embarquée et, du même coup, les besoins

Figure 24

L'alimentation par induction et ses nombreux avantages.



- Pas de risque d'électrocution
- Laisse la surface de chaussée libre pour tous les modes
- Peu sujet au vandalisme
- Aucune installation visible en surface
- Pas besoin de sortir du véhicule
- Gain de ~ 80 % sur la batterie



en matériaux, notamment en lithium.

Et pour terminer, pourquoi ne pas concevoir, lorsque les technologies photovoltaïques à grande surface et bas coût seront disponibles, une route capable d'être à la fois un capteur solaire et, lorsque les techniques de transfert par induction seront suffisamment rapides, un pourvoyeur d'énergie, au moins partiel, pour les véhicules qui l'empruntent ? La route sera alors vraiment une route à énergie positive...

#### **2.4. Conclusion : des voies de recherche prometteuses pour le transport de demain**

Ce chapitre avait pour ambition de jeter un regard de chimiste, ou plutôt de physico-chimiste, sur ce qui ne bouge pas, mais est pourtant aussi indispensable que la voiture, le train, l'avion ou d'autres véhicules pour assouvir l'impérieux besoin de mobilité de nos

sociétés. Ces infrastructures de transport – routes, canaux, voies ferrées, ponts, tunnels, ports, aéroports – constituent un monde qui a la réputation d'être plutôt traditionnel et rustique. Pourtant, et c'est ce que ce chapitre a essayé de montrer, ce monde s'apprête à vivre et vit déjà des évolutions comparables à celles que vivent les véhicules. Ces évolutions ne touchent pas seulement les matériaux utilisés. Elles touchent la fonction même que les infrastructures doivent assurer. La route pourrait ainsi devenir solaire, électrique, résiliente, « intelligente » et jouer un rôle actif dans la sécurité et l'efficacité du trafic. Pour futuristes qu'elles soient, ces pistes ne sont pas irréalistes. Un certain nombre d'entre elles se sont déjà concrétisées dans des « démonstrateurs » et, en tout état de cause, elles indiquent des voies de recherche très stimulantes pour les scientifiques et ingénieurs de la profession.