

Chimie et transports



Cet ouvrage est issu du colloque « Chimie et transports, vers des transports décarbonés »,
qui s'est déroulé le 3 avril 2013 à la Maison de la Chimie.

« COLLECTION CHIMIE ET ... »

Collection dirigée par Bernard Bigot

Président de la Fondation internationale de La Maison de la Chimie

Chimie et transports

Michel Accary, Dominique Aimon, François-Xavier Bécot, Jean Botti,
Jean-Pierre Brunelle, Daniel Bursaux, Daniel Cadet, Sébastien Candel,
Fabien Chevillotte, François Darchis, Bruno Dubost, Luc Jaouen, Sophie Jullian,
Dominique Larcher, Roseline Legrand, Francis Ménil, Henri Trintignac,
Henri Van Damme, Laurent Vaucenat

Coordonné par Minh-Thu Dinh-Audouin,
Danièle Olivier et Paul Rigny



Conception de la maquette intérieure et de la couverture :
Pascal Ferrari et Minh-Thu Dinh-Audouin

Images de la couverture : Véhicule électrique : concept-car smart
forvision, Daimler ; moteur M88 du Rafale : www.snecma.com ;
toit du concept-car : BASF. En 4^e de couverture : avion électrique,
EADS ; sous-marin nucléaire, DCNS.

Iconographie : Minh-Thu Dinh-Audouin
Mise en pages et couverture : Patrick Leleux PAO (Caen)

Imprimé en France

ISBN : 978-2-7598-1075-8

Tous droits de traduction, d'adaptation et de reproduction par tous procédés, réservés pour tous pays. La loi du 11 mars 1957 n'autorisant, aux termes des alinéas 2 et 3 de l'article 41, d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective », et d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation intégrale, ou partielle, faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (alinéa 1^{er} de l'article 40). Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles 425 et suivants du code pénal.

© EDP Sciences 2014

EDP Sciences
17, avenue du Hoggar, P.A. de Courtabœuf, BP 112
91944 Les Ulis Cedex A, France

Ont contribué à la rédaction de cet ouvrage :

Michel Accary

DCNS
Directeur Technique et
Innovation

Dominique Aimon

Groupe Michelin
Directeur de la Communication
Scientifique et Technique

François-Xavier Bécot

Matelys – Research Lab
Co-gérant – associé
Chercheur acoustique et
matériaux poro-élastiques

Jean Botti

EADS
Directeur Général Délégué
Technologie et Innovation

Jean-Pierre Brunelle

Solvay
Directeur Innovation Procédés

Daniel Bursaux

Directeur général
des infrastructures
des transports et de la mer
Ministère de l'Écologie,
du développement durable
et de l'énergie

Daniel Cadet

Alstom
Directeur des affaires
techniques extérieures

Sébastien Candel

Professeur à l'École Centrale
Paris et professeur honoraire
à l'Institut Universitaire
de France,
Laboratoire EM2C,
CNRS (UPR288)
Académie des Sciences
Académie des Technologies

Fabien Chevillotte

Matelys – Research Lab
Co-gérant – associé

François Darchis

Air Liquide
Directeur de la Société
Recherche et Développement,
Nouveaux Métiers Innovation
et Technologies, Propriété
Intellectuelle, Ingénierie
et Construction, Branche
d'Activité Industriel Marchand
(IM).

Bruno Dubost

Constellium
Directeur scientifique
Membre de l'Académie des
technologies

Luc Jaouen

Matelys – Research Lab
Co-gérant – associé

Sophie Jullian

Directrice scientifique
Institut Français du Pétrole
Énergies Nouvelles (IFPEN)

Dominique Larcher

Professeur à l'Université
de Picardie Jules Verne
Laboratoire de Réactivité
et Chimie des Solides,
UMR CNRS 7314
Réseau sur le Stockage
Électrochimique de l'Énergie
(RS2E), FR CNRS 3459

Armand Lattes

Professeur Émérite
des Universités
Université Paul Sabatier
(Toulouse)

Roseline Legrand

Directrice générale adjointe
du SYTRAL (SYndicat mixte des
Transports pour le Rhône et
l'Agglomération Lyonnaise)

Francis Ménil

Directeur de recherche CNRS
Laboratoire d'Intégration des
Matériaux aux Systèmes (IMS)
Université de Bordeaux

Henri Trintignac

A&H Conseil
Président

Henri Van Damme

Directeur scientifique
d'IFSTTAR (Institut
Français des Sciences et
Technologies des Transports,
de l'Aménagement et des
Réseaux)

Laurent Vaucenat

Directeur Monde Grands
Comptes Renault-Nissan/PSA
au sein de BASF
Directeur de l'activité Peinture
Constructeur du site de BASF
(Clermont de l'Oise), BASF

Équipe éditoriale :

**Minh-Thu Dinh-Audouin,
Danièle Olivier
et Paul Rigny**

Vj ku' r ci g' k p v g p v k q p c m { ' i g h v ' d r e p m

Sommaire

Avant-propos : par **Danièle Olivier** et **Paul Rigny** 9

Préface : par **Bernard Bigot**..... 11

Introduction

Les infrastructures de transport et l'exploitation du réseau

Partie 1 : Le cas des transports urbains de l'agglomération lyonnaise d'après la conférence de **Roseline Legrand** 15

Partie 2 : Les apports de la chimie dans les projets d'avenir par **Henri Van Damme** 23

Partie 1

La chimie au service du futur des véhicules

Introduction par **Armand Lattes** 43

Chapitre 1 : La catalyse au service de l'automobile par **Jean-Pierre Brunelle** 49

Chapitre 2 : Comment la chimie contribue-t-elle à la performance des véhicules électriques de demain ? d'après la conférence de **Laurent Vaucenat** 63

Chapitre 3 : La chimie donne des ailes d'après la conférence de **Jean Botti**..... 73

Chapitre 4 : La chimie et le rail d'après la conférence de **Daniel Cadet** 81

Chapitre 5 : Chimie et construction navale par **Michel Accary** 93

Partie 2

Matériaux et transports durables

Chapitre 6 : Les alliages d'aluminium pour l'allègement des structures dans l'aéronautique et la carrosserie automobile par **Bruno Dubost** 105

- Chapitre 7** : Le pneumatique : innovation et haute technologie pour faire progresser la mobilité
par **Dominique Aimon**..... 135
- Chapitre 8** : La zircone, matériau phare contre la pollution des échappements automobiles
par **Francis Ménil**..... 149
- Chapitre 9** : Vers une connexion des corps de métiers, pour des microstructures améliorées pour les transports
d'après la conférence de **François-Xavier Bécot**
avec les contributions de **Fabien Chevillotte**
et **Luc Jaouen**..... 161

Partie 3 Énergie et transports durables

- Chapitre 10** : La combustion et les défis de la propulsion aéronautique et spatiale
par **Sébastien Candell** 175
- Chapitre 11** : Vers des transports décarbonés : carburants, combustion et post-traitement pour les transports routiers
par **Sophie Jullian** 195
- Chapitre 12** : Le moteur thermique comparé au moteur électrique. Enjeux et contraintes
par **Henri Trintignac** 215
- Chapitre 13** : Le stockage de l'énergie dans le monde des transports
par **Dominique Larcher** et **François Darchis**..... 229
- Conclusion** : Qualité de vie et mobilité
par **Daniel Bursaux**..... 257

Avant- propos

Depuis 2007, la Fondation de la Maison de la Chimie organise des colloques destinés à un large public de chimistes – étudiants, enseignants, ingénieurs, décideurs, chercheurs non spécialistes, journalistes – pour faire prendre conscience que cette discipline (prise comme science ou comme technique) est présente au cœur de toutes les activités techniques qui nous entourent, même si, bien souvent, elle n'est pas d'abord identifiée comme le partenaire indispensable qu'elle est.

Ces colloques sont repris sous forme de livres, qui présentent les conférences mises en forme pour utilisation par les lecteurs, et constituent une collection « Chimie et... », publiée par les éditions EDP Sciences. C'est ainsi que sont parus : *La chimie et la mer, ensemble au service de l'homme*, *La chimie et la santé au service de l'homme*, *La chimie et l'art, le génie au service de l'homme*, *La chimie et le sport*, *La chimie et l'alimentation, pour le bien être de l'homme*, *La chimie et l'habitat*, *La chimie et la nature*, *Chimie et enjeux énergétiques*, et qu'aujourd'hui, nous présentons *Chimie et transports*. Si riche qu'elle

soit déjà, cette liste n'épuise pas l'ensemble des activités humaines qui bénéficient de la chimie, et d'autres colloques sont en préparation, qui donneront naissance à d'autres ouvrages dans les mois et les années qui viennent.

Si les transports ont toujours été un élément déterminant du développement de la civilisation humaine, ce domaine connaît aujourd'hui une dimension historiquement complètement nouvelle à l'heure du transport aérien et de la généralisation du transport automobile. Par ailleurs, les outils qui permettent cette activité semblent menacés par l'appauvrissement que l'on connaît sur la disponibilité en matières premières (pas seulement celles qui fournissent les carburants mais aussi celles qui sont à la base des matériaux constitutifs des équipements). Autant dire que nous avons, avec les transports, affaire à un défi vital pour la civilisation à laquelle nous sommes attachés. *Chimie et transports* montre comment ce défi sollicite la chimie par nombre de ses branches (chimie de la combustion, chimie des matériaux polymères, chimie des métaux, modélisation,

etc.). Malgré les points de vue optimistes que l'on peut entendre (« la voiture électrique, c'est déjà au point... », « les biocarburants, c'est un domaine maîtrisé », etc.), il ne faut pas cacher que ces défis ne sont pas encore gagnés : de nouveaux efforts, de nouvelles recherches doivent être poursuivis – et tout particulièrement dans le domaine de la chimie – pour que des ruptures sociétales extrêmes soient évitées.

La publication de ces ouvrages est liée à une autre opération de diffusion de la Chimie menée par la Fondation de la Maison de la Chimie : la création, le lancement et la mise à jour d'un site Internet, dénommé Médiachimie (www.mediachimie.org), qui donne à tous ceux qui s'intéressent à cette discipline – et prioritairement au monde de l'éduca-

tion – la possibilité de trouver les réponses aux questions qu'ils se posent sur la chimie. À (idéalement) toutes les thématiques abordées, Médiachimie fait correspondre des « ressources » qui permettent au lecteur d'aller plus loin dans sa compréhension. Les ouvrages « Chimie et... » constituent des ressources – déjà mises en forme pour un large public – qui sont particulièrement adaptées dans ce contexte et sont reprises par le site Mediachimie.

Danièle Olivier,
*Vice-présidente
de la Fondation de la Maison
de la Chimie*

Paul Rigny,
*Conseiller scientifique
après du président
de la Maison de la Chimie*

Préface

La mobilité est un sujet de grande actualité non seulement à l'échelle nationale mais plus encore à l'échelle mondiale. Pour s'en convaincre, il suffit d'avoir en tête que : en moyenne chaque français parcourt chaque jour de l'année, hors déplacements pédestres et donc en utilisant un moyen de transport individuel ou collectif, plus de 25 kilomètres, en y consacrant environ une heure de son temps ; ou que l'ensemble de la planète compte actuellement 1,1 milliard de voitures particulières, nombre qui s'accroît au rythme de 35 millions par an, soit 100 000 nouvelles voitures en plus chaque jour ; ou bien encore qu'il y a 20 000 avions de ligne qui circulent quotidiennement dans le monde, qu'ensemble ils effectuent environ 30 millions de vols par an et parcourent quelque 90 milliards de kilomètres. Songeons aussi que le nombre de véhicules particuliers utilitaires est passé en France de 23 millions en 1982 à 38 millions en 2012, et en 2012, en France encore, nous avons consommé 50 milliards de litres d'essence ou de diesel pour nous transporter, soit en moyenne pour chacun d'entre nous, par jour et par personne, des plus jeunes aux plus an-

ciens, 2 litres de ces combustibles. Et pour conclure ces données statistiques, sachons qu'en France, l'automobile individuelle représente 65 % des kilomètres parcourus chaque année, la marche à pied seulement 22 %, les transports en commun 8 % et les deux roues 5 %.

Si nous y réfléchissons un instant nous serons vite convaincus que la chimie est toujours à la source, au cœur ou en aval de ces déplacements. En effet elle contribue à produire les matériaux indispensables à la fabrication des voitures, deux roues, métro, tramways, avions, trains ou bateaux, elle permet de réduire leurs émissions et leurs nuisances, elle assure la transformation de grandes quantités de matières premières en énergie pour leur motorisation. Elle permet de recycler les équipements utilisés en fin de vie, elle contribue à la construction des infrastructures et à leur maintenance. Les défis sont donc considérables pour améliorer l'efficacité et le confort des transports mais aussi pour réduire leur coût et leurs inévitables effets non désirés.

Cet ouvrage issu du colloque organisé par la Fondation de la Maison de la Chimie le

3 avril 2013 est fait pour que chacun ait accès aux informations nécessaires à un débat éclairé et serein. En coordonnant sa publication, la Fondation de la Maison de la Chimie est pleinement dans ses missions. En effet, depuis sa création en 1934, il y a donc 78 ans, l'une de ses missions principales est de travailler à l'expansion et au développement de la science chimique et à sa promotion, ainsi que de toutes ses applications, en facilitant les rencontres entre les savants, les ingénieurs, les entrepreneurs et l'ensemble de nos concitoyens, pour permettre une meilleure compréhension mutuelle des enjeux dont chacun est porteur. Dans ce cadre, nous avons particulièrement intensifié nos efforts pour aider à faire prendre conscience à un large public, non spécialiste, de l'apport de la chimie dans la vie quotidienne, préparer l'avenir en encourageant les jeunes à s'orienter vers l'industrie et la recherche, et contribuer ainsi au développement d'une industrie chimique innovante et compétitive. La série des ouvrages de la collection « Chimie et... », dont celui-ci est le neuvième, répond à ces objectifs. Les thèmes transdisciplinaires choisis ont toujours une grande importance sociale, scientifique, technique, économique ou culturelle, et correspondent à la volonté de mettre la science au service des hommes et à l'amélioration de leur qualité de vie. Le domaine des transports connaît depuis plusieurs décennies un développement ininterrompu. La croissance

démographique, le développement de la mondialisation des échanges, l'augmentation du nombre et de la taille des villes avec la séparation de plus en plus fréquente entre le lieu de vie et le lieu de travail, l'augmentation de niveau de vie de nombreuses personnes, induisent un accroissement important de la demande de transport. Dans le précédent ouvrage de la collection, *Chimie et enjeux énergétiques*, publié en septembre 2013, il est montré que les transports représentent un tiers de la consommation d'énergie finale mondiale et que les émissions de dioxyde de carbone, ou plus généralement des gaz à effet de serre, qui en résultent, ne cessent d'augmenter depuis plus de vingt ans. Sans évolution dans ce domaine, les conséquences environnementales atteindront des limites difficilement supportables, en termes de réchauffement climatique et de dégradation de la qualité de l'air, mais aussi en conséquences sociales et économiques : énergie, aménagements urbains et autoroutiers, temps perdu dans les embouteillages, etc.

La chimie est, nous le savons, étroitement associée à la recherche de solutions innovantes qui associent l'ensemble des acteurs de la filière transports. Des responsables et des experts de la recherche et de l'innovation dans tous les domaines des transports ont accepté de contribuer à la réalisation de cet ouvrage pour nous expliquer, en termes compréhensibles par tous mais néanmoins avec la plus grande rigueur scientifique,

les derniers résultats de leurs travaux et de leurs projets, réalistes, d'évolution et d'innovation dans ce domaine éminemment transdisciplinaire.

Il y va de notre qualité de vie mais aussi de notre développement économique et de l'emploi manufacturier dans notre pays. Les défis industriels à relever sont nombreux. Il n'existe jamais d'approche ou de réponse unique à un défi de ce type. Les meilleures solutions résultent de la synergie des talents et des efforts. Ce 9^e ouvrage de la collection « Chimie et... » en est particulièrement l'illustration, puisque deux chapitres sont largement centrés sur les politiques publiques, avec les dimensions liées à l'urbanisme, la sociologie et en relation avec la qualité de la vie.

Organisé en trois parties, la première partie porte sur le thème de la chimie au service du futur des véhicules, où tous les domaines sont abordés : automobile, transport ferroviaire, transport maritime, transport aérien. En effet dans tous ces domaines, avec bien sûr des spécificités, la chimie intervient, au niveau de la production, de la distribution et du stockage de l'énergie, avec notamment le domaine des hydrocarbures, où il faut prendre en compte les exigences en termes d'économie de la ressource, de maîtrise de croissance de la demande et de réduction de l'impact environnemental et climatique ; avec des recherches concernant la modélisation des phénomènes de combustion pour tenter de réduire encore la consommation kilométrique ; avec les batteries aussi, et

les piles à combustible pour améliorer leur indispensable compétitivité.

La seconde partie montre que l'amélioration des performances, la durabilité de la sécurité et du confort des véhicules passent par l'amélioration des propriétés des matériaux existants ou le développement de nouveaux matériaux tels que de nouveaux alliages métalliques, des matériaux composites pour l'allègement des structures, l'usage des fibres de carbone ou polymères, des résines, des mousses, des colles, des huiles et lubrifiants, une multiplicité de produits de haute technologie, dont les caractéristiques peuvent être adaptées sur mesure, et enfin, de la physico-chimie, de l'électrochimie ou de la biochimie, qui interviennent dans des domaines de recherche aussi divers que la qualité de l'atmosphère dans le véhicule, la protection contre la corrosion ou les nombreux capteurs électroniques, désormais embarqués.

La troisième partie permet d'approfondir, grâce à des exemples d'applications, certains points relevant des domaines de l'énergie : la combustion, les carburants, le stockage.

Je vous en souhaite une agréable lecture

Bernard Bigot

*Président de la Fondation
Internationale de la Maison
de la Chimie*

*Administrateur Général
du CEA*

Vj ku' r ci g' k p v g p v k q p c m { ' i g h v ' d r e p m

Les infrastructures de transport et l'exploitation du réseau

Roseline Legrand est directrice générale adjointe du SYTRAL¹ (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)².

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 km² 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

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.

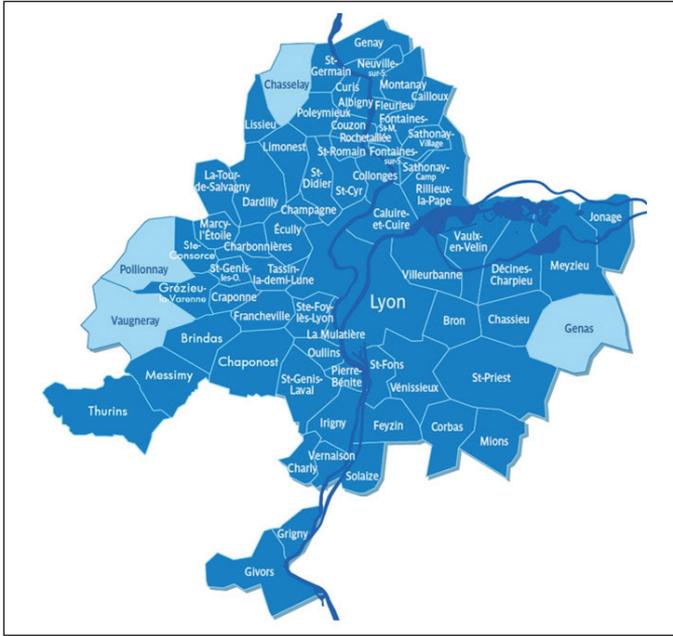


Figure 1

Périmètre d'action du SYTRAL :
 – 58 communes et 4 villes périphériques ;
 – adhésion de six nouvelles communes en 2013 (Brindas, Chaponost, Grezieu-la-Varenne, Messimy, Ste Consoire and Thurins) ;
 – 613 km² ;
 – 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).

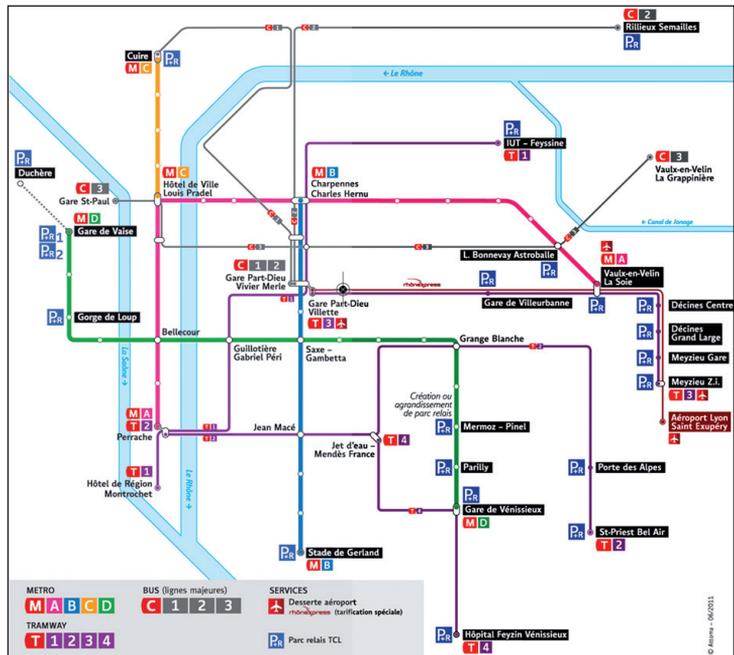


Figure 2

Schéma du réseau de transports lyonnais.

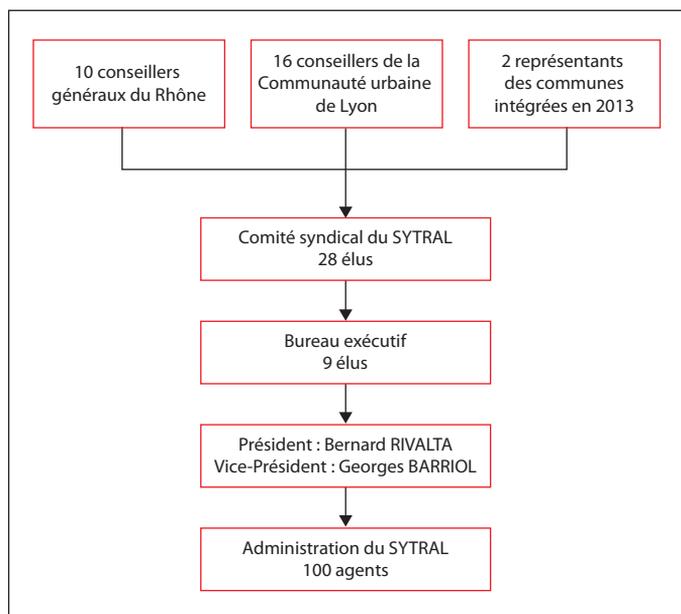


Figure 3

Structure du SYTRAL.

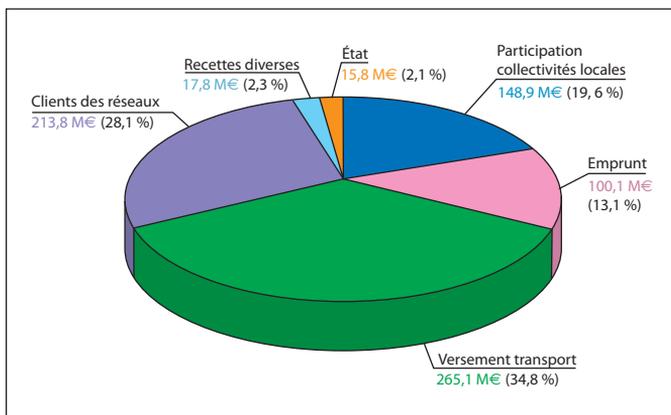
Le rôle d'une autorité organisatrice de transports, c'est d'abord de financer le réseau de transport et son développement, d'assurer la propriété de toutes les infrastructures, de l'équipement et du matériel roulant qui composent ce réseau ; c'est de déterminer l'offre de transport adaptée à la fois 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).



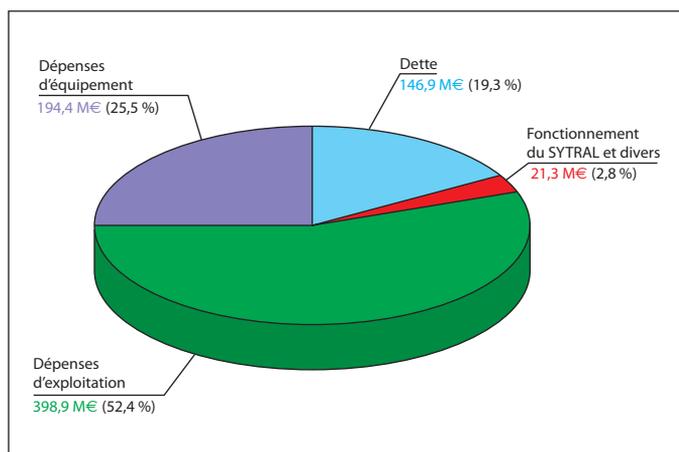


Figure 5

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 CO₂ 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 CO₂ de 75 000 tonnes par an, c'est-à-dire réduire de 1 % les émissions de CO₂ 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

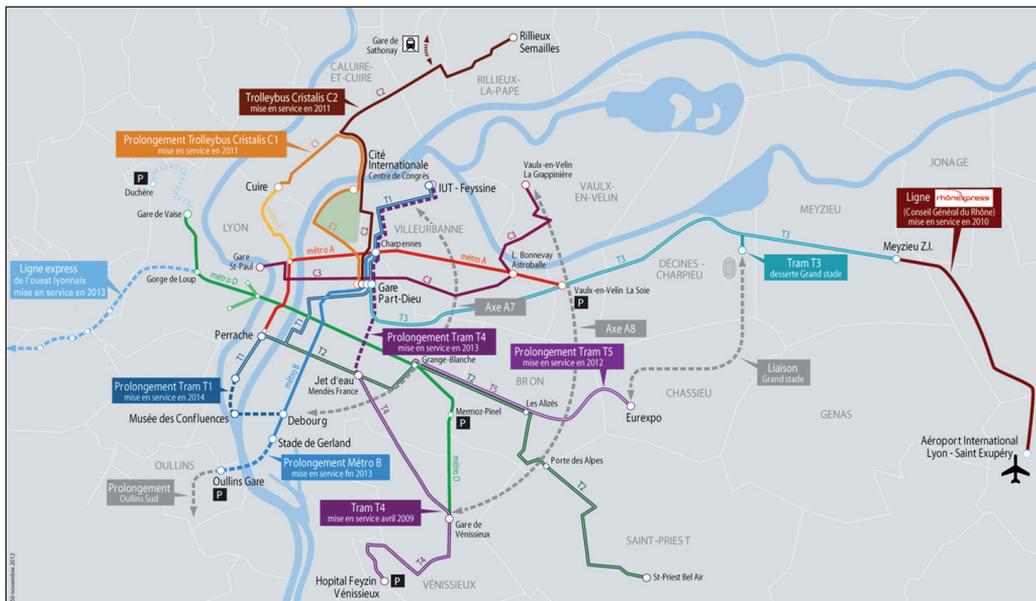
puis à une échelle beaucoup plus locale, d'impulser une politique d'économie d'énergie auprès de son exploitant. Favoriser l'usage des transports en commun, cela veut dire développer et optimiser l'offre de transport, améliorer l'attractivité du réseau, développer le maillage, améliorer l'information 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 CO₂.

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 démarrages, 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

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 7

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

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 CO₂ en moins chaque année).

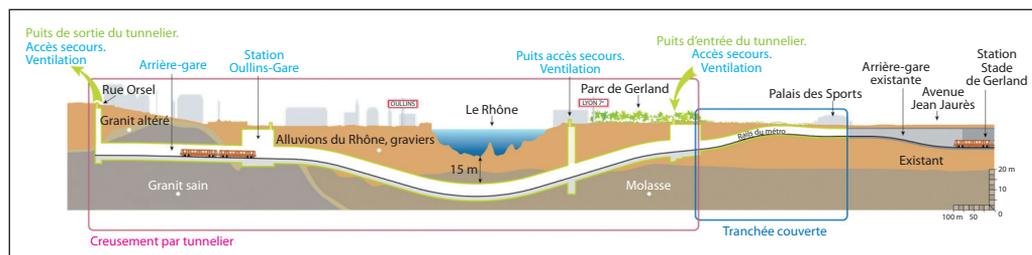




Figure 9

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 économique 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 grande 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^{er} 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

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 grande 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^{er} 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.

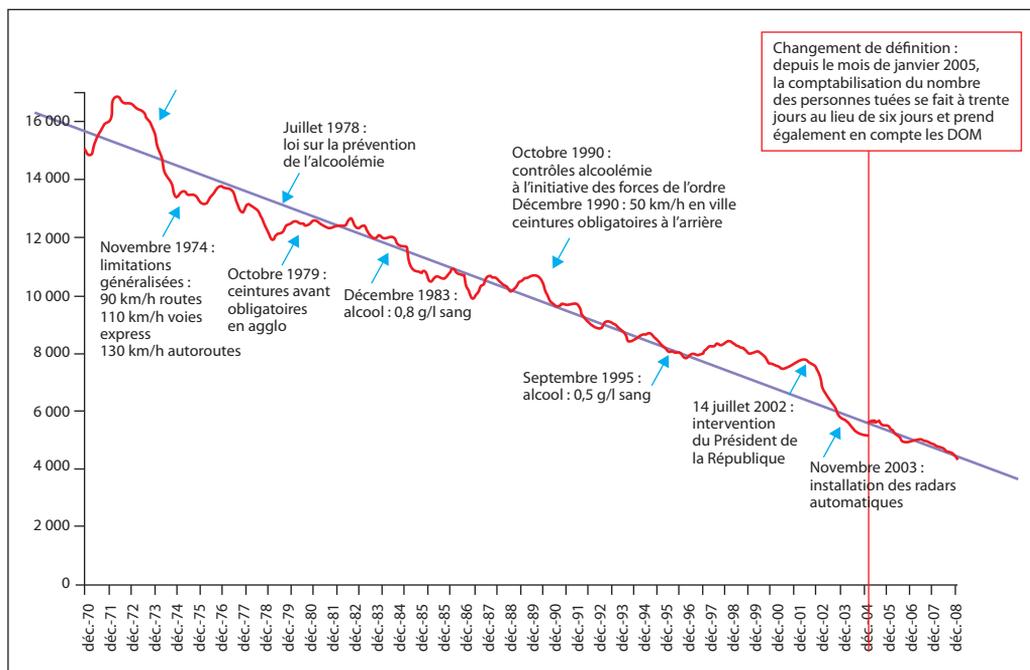
2.1. Une mobilité en forte évolution

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 déplacements 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**³, 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 multi-modalité. 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.

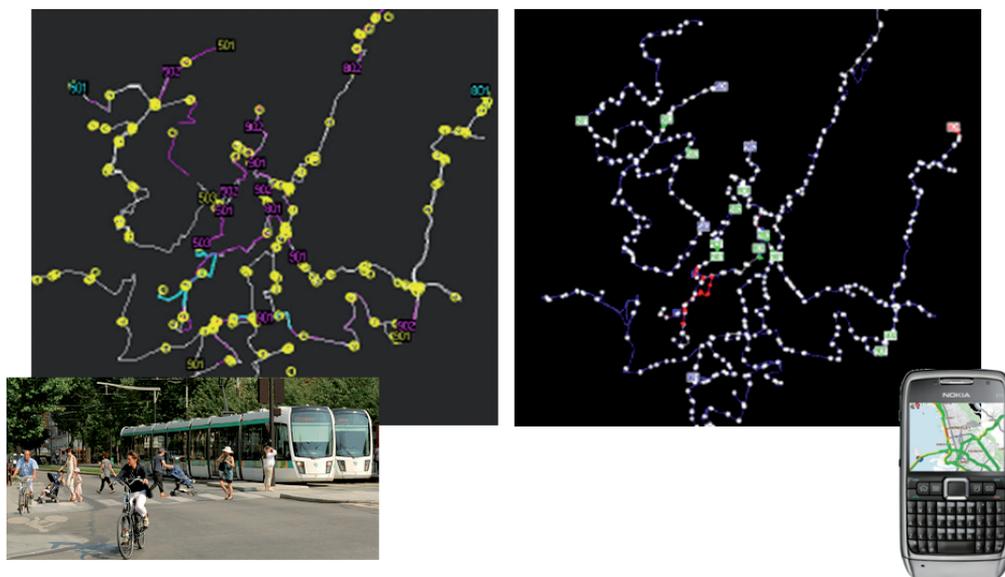


Figure 11

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.