



LES TECHNIQUES DES TRANSPORTS ET LA RÉGION LYONNAISE

Rétrospective, actualité, prospective

Février 2007
Etude réalisée par Boris Chabanel

Résumé

Les déplacements des hommes et des marchandises tiennent depuis toujours une place essentielle dans le fonctionnement des sociétés. De la préhistoire et ses premières embarcations fluviales jusqu'à aujourd'hui, l'homme a su mettre en œuvre d'autres moyens de transport que sa seule force musculaire. Jusqu'à la révolution industrielle, la roue, la force animale, l'énergie éolienne et le bateau ont été les seuls moyens disponibles. A partir de là, nous entrons dans l'ère du transport motorisé : machine à vapeur, moteur à explosion, moteur électrique. C'est ainsi qu'émergent les véhicules modernes par excellence : la locomotive, l'automobile, l'avion.

Parce qu'il repose principalement depuis 150 ans sur le couple moteur à explosion-pétrole, le système de transport est cependant devenu l'un des principaux facteurs du phénomène du changement climatique : il est à l'origine d'une grande partie des émissions de gaz à effet de serre.

Dans cette histoire des techniques des transports et face à cet enjeu environnemental central, la région lyonnaise tient une place de premier plan. D'une part, elle a joué un rôle essentiel dans la mise au point et la diffusion des transports ferroviaires et poids lourd. D'autre part, elle peut aujourd'hui compter sur des acteurs majeurs sur la scène mondiale pour proposer les solutions technologiques à même de répondre aux défis des transports qui se profilent, notamment dans le cadre du pôle de compétitivité «Lyon Urban Truck&Bus 2015 ».

Sommaire

INTRODUCTION	5
PANORAMA (NON EXHAUSTIF) DU SYSTÈME TECHNIQUE DES TRANSPORTS AUJOURD'HUI	7
RETROSPECTIVE DE L'ÉVOLUTION DES TECHNIQUES DES TRANSPORTS	9
LES TENDANCES DU SECTEUR DES TRANSPORTS AUJOURD'HUI EN FRANCE	43
LES DEFIS TECHNOLOGIQUES DE L'AVENIR DES TRANSPORTS	55
LES PRINCIPAUX ACTEURS DE LA RECHERCHE EN MATIÈRE DE TECHNOLOGIES DES TRANSPORTS EN RÉGION LYONNAISE	81
ANNEXE : PROPOSITION DE HIÉRARCHIE DES AVANCÉES TECHNIQUES DANS LE DOMAINE DES TRANSPORTS À L'ÉCHELLE MONDIALE ET À L'ÉCHELLE DE LA RÉGION LYONNAISE	87
SOURCES	89

Table des matières

INTRODUCTION	5
PANORAMA (NON EXHAUSTIF) DU SYSTÈME TECHNIQUE DES TRANSPORTS AUJOURD'HUI	7
RETROSPECTIVE DE L'ÉVOLUTION DES TECHNIQUES DES TRANSPORTS	9
De la préhistoire à la révolution industrielle : un système de transport terrestre et maritime reposant d'une part sur l'animal, la roue, la route et, d'autre part, sur l'eau, le vent, les bateaux	9
A partir de -3 millions d'années, l'essor des outils de pierre	9
-50 000 ans : apparition des premières embarcations pour la navigation sur l'eau	9
-10 000 ans : la révolution néolithique de la sédentarisation par l'agriculture et l'élevage	9
-5 000 ans : premières utilisations de la force animale pour le transport	10
-4 300 ans : invention de la roue	10
-3 300 ans : invention du premier système d'écriture	10
- 3 000 ans : premières utilisations du vent pour la propulsion des bateaux	10
-2 000 à -1 900 ans : les premières infrastructures routière pavées	11
8 ^{ème} siècle : invention de l'étrier et... premier vol en planeur par l'homme	11
9 ^{ème} siècle : invention du collier d'épaule et du fer à cheval	11
A partir du 12 ^{ème} siècle, diffusion de la boussole en Europe	12
15 ^{ème} siècle : création du premier service de transports interurbains par Louis XI	12
17 ^{ème} siècle : invention du taxi par Nicolas Sauvage et des transports en commun urbains par Blaise Pascal	12
1800-1900 : la machine à vapeur et les transports, victoires et déboires	13
La machine à vapeur et les transports terrestres : l'essor de la locomotive à vapeur se fait au détriment des applications automobiles mais n'empêche pas l'apparition du... vélo	13
La machine à vapeur et les transports maritimes : les bateaux à vapeur supplantent progressivement les bateaux à voile	18
La machine à vapeur et les transports aériens : la première ne participe qu'aux premiers balbutiements des seconds	20
1860-1900 : le moteur à explosion et le moteur électrique, invention des vecteurs énergétiques centraux des transports au 20^{ème} siècle	22
1860-1907 : mise au point du moteur à explosion et première application à l'automobile et à l'aviation	22
1869-1891 : Mise au point du moteur électrique et première application aux locomotives et à l'automobile	27
1900-2000 : l'explosion des mobilités motorisées et la course à la performance technique	29
1900-1970 : de l'industrialisation de la production automobile à la démocratisation de son usage	30
Depuis 1970 : l'amélioration du comportement écologique de l'automobile	34
1910-2000 : la mise en place d'une filière de production aéronautique et d'une offre commerciale dédiée	36
1900-2000 : les transports ferrés et métropolitains entre rationalisation et innovation	39
LES TENDANCES DU SECTEUR DES TRANSPORTS AUJOURD'HUI EN FRANCE	43
Le marché des transports	43
Depuis une trentaine d'années, à l'instar de l'évolution du PIB, la croissance des trafics a été nettement plus forte que celle de la population	43
La prédominance des transports routiers sur les autres modes	44
Les enjeux du secteur des transports	47
Les transports, principaux contributeurs des émissions de CO ₂ de la France	47
« L'immobilité quotidienne », facteur d'exclusion sociale	49
LES DEFIS TECHNOLOGIQUES DE L'AVENIR DES TRANSPORTS	55
Premier levier technologique : systématiser les économies d'énergies	55
Le secteur des transports : développer des véhicules plus économes en carburants	56
Le secteur des transports : développer les modes de transports de passagers et de marchandises alternatifs à la route	63
Deuxième levier technologique : développer les filières énergétiques faiblement émettrices de dioxyde de carbone	72
Le secteur des transports : développer les alternatives aux hydrocarbures et aux moteurs à explosion	72

Le secteur des transports : développer les réseaux de transports électriques	78
LES PRINCIPAUX ACTEURS DE LA RECHERCHE EN MATIÈRE DE TECHNOLOGIES DES TRANSPORTS EN RÉGION LYONNAISE	81
Les acteurs lyonnais des technologies d'économie d'énergie dans les transports.....	81
L'amélioration des moteurs conventionnels, voie de recherche majeure de l'IFP et le pôle de compétitivité lyonnais « Lyon Urban Truck&Bus 2015 »	81
La motorisation hybride, autre enjeu de recherche pour l'IFP et « Lyon Urban Truck&Bus 2015 »	82
Les véhicules de transports collectifs urbains de demain, l'un des horizons de projet de « Lyon Urban Truck&Bus 2015 »	83
La promotion des modes de transports « doux », l'initiative « Vélo'v » du Grand Lyon.....	84
Les acteurs lyonnais des technologies énergétiques alternatives aux hydrocarbures et aux moteurs à explosion	85
Les biocarburants, autre axe majeur des recherches conduites par l'Institut Français du Pétrole	85
Les biocarburants, objet de recherche du centre de recherche de Total	85
ANNEXE : PROPOSITION DE HIÉRARCHIE DES AVANCÉES TECHNIQUES DANS LE DOMAINE DES TRANSPORTS À L'ÉCHELLE MONDIALE ET À L'ÉCHELLE DE LA RÉGION LYONNAISE	87
SOURCES	89

INTRODUCTION

Depuis l'aube de l'humanité, les déplacements des hommes et des marchandises sont au cœur des activités humaines, et notamment de la mise en valeur des ressources de l'environnement naturel. Progressivement, l'homme a su mettre en œuvre d'autres moyens de transport que sa seule force musculaire : énergie animale, énergie éolienne, roue, moteur à explosion...

Aujourd'hui, cette démarche de mise au point de moyens de transport toujours plus rapides et puissants rencontre des limites de taille : d'une part, les moyens de transport actuels sont principalement alimentés par des énergies fossiles (pétrole, gaz, charbon) menacées d'épuisement et dont la combustion se traduit par un réchauffement de l'atmosphère qui menace dangereusement les grands équilibres gouvernant les processus climatiques ; d'autre part, l'amplification du nombre, de la portée et de la vitesse des déplacements tend à faire de la mobilité, ou plutôt de l'immobilité, un nouveau facteur d'inégalité sociale.

Par ailleurs, sur un plan strictement économique, les transports constituent un secteur d'activité essentiel pour l'ensemble du système productif mondial, la mondialisation de l'économie reposant fortement sur l'efficacité des réseaux de transports. De ce point de vue, la région lyonnaise apparaît comme un territoire important de l'industrie des transports, berceau notamment de l'essor du véhicule poids lourd.

Parce que la métropole lyonnaise ambitionne de devenir une référence en matière de

développement des nouvelles technologies des transports, notamment dans le cadre du pôle de compétitivité «Lyon Urban Truck&Bus 2015 », le centre de ressource Millénaire 3 de la direction prospective et stratégie du Grand Lyon a souhaité disposer d'un éclairage historique sur l'évolution des techniques des transports pour mieux comprendre les enjeux en présence et la place de la région lyonnaise. C'est objet de ce document.

La question des transports s'inscrit dans la grande histoire des techniques. Comme le souligne Jean Baudet (2003), s'il existe des sociétés humaines sans littérature ou sans droit, il n'y en a pas sans technique (ensemble des techniques). La technique serait ainsi au fondement même de l'humanité, puisque c'est en inventant l'outil (le fameux silex) qu'un certain singe, il y a quelques millions d'années, devint un homme, exprimant par là sa nature d'espèce vivante consciente. L'outil humain n'a en effet rien d'inné. Il est non corporel puisque prélevé dans l'environnement. Il est utilisé pour prolonger les capacités humaines, dépasser les limites du corps. Il est perfectible et donc modifiable par l'action humaine pour en faire évoluer la forme et la fonction. Surtout, la technique, dont l'outil est l'expression élémentaire¹, a vocation à répondre à aux besoins humains (besoin de manger, besoin de se chauffer, besoin de s'éclairer...). La satisfaction d'un besoin correspond à la nature économique du

¹ L'évolution des techniques fera apparaître des vecteurs plus complexe que l'outil : le mécanisme, la machine, le système.

fait technique : la production de la technique est un effort pour économiser des efforts ultérieurs. Au total, la technique, prise dans sa totalité, est l'ensemble des moyens correspondant à l'ensemble des besoins de l'humanité (J.Baudet, 2003).

La réalité de l'environnement dans lequel l'homme vit et développe ses techniques est découpée par la technique à peu près comme elle l'est par la science. Il y a les techniques de l'espace : le génie civil pour les «ouvrages d'arts», les moyens de transports, l'architecture... Il y a les techniques de la matière : production agro-alimentaire, chimie industrielle, métallurgie... Il y a les techniques de l'énergie : production, transport et distribution de l'énergie. Il y a les techniques de l'information : comptabilité, organisation des entreprises, informatique, télécommunications...

Formé par les racines latines «trans», au delà, et «portare», porter, le terme transport désigne l'activité qui consiste à faire passer d'un lieu à un autre, aussi bien des hommes que des marchandises ou encore de l'information. Par extension, « les transports » renvoient à l'ensemble des moyens employés pour transporter les marchandises et les personnes. D'un point de vue technique, chaque moyen de transport comprend, d'une part, une infrastructure (chemin de fer, voie d'eau, route, aéroport...), c'est à dire une portion d'espace affectée exclusivement à une technique de transport, et, d'autre part, un véhicule (locomotive, bateau, automobile, avion...), qui se caractérise par des techniques de guidage, de propulsion, de contrôle, d'utilisation de sources d'énergie (F.Plassard, 2003). L'exposé qui suit porte essentiellement sur l'évolution des véhicules.

Dans un premier temps est proposée une rétrospective de l'évolution des techniques des transports, avec le souci de mettre en évidence les contributions de la région lyonnaise à cette histoire. Le second point formule un état des lieux actuel du rapport entre l'offre et la demande de transport en France. La troisième partie s'efforce de mettre en évidence les grandes lignes de l'enjeu des transports au 21^{ème} siècle. Enfin, une dernière partie met en évidence les principaux acteurs de la région lyonnaise engagés dans des travaux de recherche s'inscrivant dans les perspectives décrites dans la partie précédente.

Avertissement

Les passages de la partie «Rétrospective de l'évolution des techniques des transports» qui concernent spécifiquement la région lyonnaise sont mis en évidence par l'intermédiaire d'un « surlignage » vertical des paragraphes concernés.

PANORAMA (NON EXHAUSTIF) DU SYSTÈME TECHNIQUE DES TRANSPORTS AUJOURD'HUI

Véhicule	Motorisation	Carburant
L'homme	Force musculaire	Nourriture
L'animal	Force musculaire	Nourriture
Le vélo	Force musculaire	Nourriture
Le bateau	Voile	Energie éolienne
	Machine à vapeur	Bois, charbon, réacteur nucléaire
	Moteur à explosion	Hydrocarbures
L'automobile	Machine à vapeur	Bois, charbon
	Moteur à explosion	Hydrocarbures
	Moteur électrique	Electricité
La locomotive	Machine à vapeur	Bois, charbon
	Moteur à explosion	Hydrocarbures
	Moteur électrique	Electricité
L'avion	Moteur à explosion	Hydrocarbures
	Moteur à réaction	Hydrocarbures

RETROSPECTIVE DE L'ÉVOLUTION DES TECHNIQUES DES TRANSPORTS

De la préhistoire à la révolution industrielle : un système de transport terrestre et maritime reposant d'une part sur l'animal, la roue, la route et, d'autre part, sur l'eau, le vent, les bateaux

De la préhistoire au 10^{ème} siècle de notre ère, la force musculaire des hommes et des animaux et la force du vent et des rivières constituent les seules sources d'énergies disponibles pour le transport.

A partir de -3 millions d'années, l'essor des outils de pierre

Au cours de cette période préhistorique qui s'étend des origines de l'espèce humaine (-3 millions d'années) à l'invention de l'écriture (-3 300 ans avant J.C.), l'invention du 1^{er} outil constitue une étape fondatrice du processus d'hominisation, c'est à dire de l'ensemble des évolutions biologiques qui ont conduit à l'apparition de l'espèce humaine.

En Afrique, dans un groupe de singes qui, depuis des générations, a l'habitude de ramasser branches ou cailloux pour attraper un fruit éloigné ou pour écraser un fruit dur, un individu ramasse deux cailloux et les cogne l'un contre l'autre. D'une des pierres, un éclat se détache, et le singe se coupe un doigt ou la paume de la main au contact du tranchant obtenu par le détachement de l'éclat. Le premier objet technique est né, ainsi que la première nuisance technique. Dans le sillage de cette découverte apparaissent les premiers humains « homo habilis » (homme habile) aux alentours de -3 millions ; armés de haches et de couteaux de pierre rudimentaires ils chassent

collectivement les animaux et établissent des camps.

-50 000 ans : apparition des premières embarcations pour la navigation sur l'eau

Les hommes proches de l'eau ont du très rapidement constater que des branches flottaient. Les premières « navigations » à cheval sur un tronç d'arbre comme l'invention du radeau datent vraisemblablement du paléolithique (-3 millions à -10 000 ans). Les premiers bateaux ont quant à eux été construits au début du Néolithique (-10 000 ans), à partir de troncs d'arbre évidés à l'aide d'outils en pierre.

-10 000 ans : la révolution néolithique de la sédentarisation par l'agriculture et l'élevage

L'invention de l'agriculture et de l'élevage apparaît au Proche-Orient, région alors considérée comme particulièrement adaptée aux exigences de la vie humaine puisque bénéficiant d'une très grande biodiversité tant végétale qu'animale. Les hommes arrivés dans cette région constatent avec plaisir que, parmi les plantes locales, il y a de nombreuses herbes à fruits comestibles en épis poussant sur de vastes étendues. Particulièrement commodes à récolter et ne s'épuisant pas, ces graminées constituent un véritable réservoir alimentaire. De même, la diversité animale du Proche-Orient se traduit par l'existence des caprinés, bovidés aisément domesticables. Cette domestication facilite l'accès à la viande, à un nouvel aliment, le lait, ainsi qu'aux peaux, cornes et autres os. Dès

lors, pourquoi marcher tout le temps ? Les hommes inventent ainsi la sédentarisation : ils se mettent à vivre au même endroit non pas pour quelques jours ou quelques semaines mais quelques mois et peut-être déjà quelques années. L'échelle des valeurs est bouleversé : découvrant le temps libre, le sédentaire peut s'adonner à de nouvelles activités que celles strictement liées à la survie.

-5 000 ans : premières utilisations de la force animale pour le transport

Le moyen de transport terrestre le plus ancien est sans doute le portage humain. Par la suite l'homme a aussi utilisé les animaux pour l'aider : le bœuf, domestiqué dès le 5^{ème} millénaire av. J.-C., sera utilisé pour tirer des charges. L'âne domestiqué au 4^{ème} millénaire av. J.-C., servira à tirer et à porter des charges ou des personnes. Le cheval, animal de luxe au II^e millénaire av. J.-C., sera plus couramment utilisé par la suite.

-4 300 ans : invention de la roue

La roue, constituée au départ de deux demi-cercles en bois plein attachés ensemble, cerclées de métal ou renforcées de clous, apparaît au 3^{ème} millénaire av. J.-C. en Mésopotamie. Elle permet aux animaux de tirer des charges beaucoup plus lourdes. Des maquettes et différentes représentations montrent des chariots à quatre roues pleines, sans doute très pesants et peu maniables, utilisés à des fins civiles ou militaires, mais aussi des chars plus légers à deux roues. Les roues à rayons apparaissent au 2^{ème} millénaire av. J.-C.

-3 300 ans : invention du premier système d'écriture

Inventée par les Sumériens pour les besoins de l'administration, l'écriture, au début, désigne un système très rudimentaire, ne comportant que des chiffres et des idéogrammes, sortes de petits dessins servant à désigner des objets, des êtres animés ou des idées. Cette écriture évolua vers le syllabisme lorsque les Sumériens eurent l'idée d'utiliser les signes pour leur valeur phonétique. Avec l'invention de l'écriture démarre l'histoire, c'est à dire une nouvelle ère de l'évolution humaine caractérisée par le fait que, dorénavant, les hommes ne vont plus laisser derrière eux seulement des ossements et des objets matériels (ce que les archéologues appellent « monuments ») mais également des textes (appelés « documents »), à condition que le support soit impérissable ou conservé dans des conditions particulières.

- 3 000 ans : premières utilisations du vent pour la propulsion des bateaux

Les premiers navigateurs constatent qu'en déployant une peau de bête ou une toile végétale tressée, tendue au bout d'une perche plus ou moins verticale fixée au fond de l'embarcation, il peuvent utiliser la force de propulsion du vent : la voile est née. Les premiers voiliers ne savent utiliser le vent que lorsqu'il vient de l'arrière, dans les autres cas, la rame reste indispensable. Mais les meilleurs navigateurs apprennent vite à domestiquer ce vent indispensable. Les égyptiens sont la première civilisation à parvenir à une parfaite maîtrise de la construction des voiliers. Ils réalisent vers 600 avant notre ère une première circumnavigation autour de l'Afrique. S'inspirant des techniques égyptiennes,

les Phéniciens et les Grecs achèvent progressivement de maîtriser la navigation en mer et explorent puis colonisent toute la méditerranée à bord de leurs navires.

Toutefois, pour le transport au quotidien des hommes et des marchandises sur les fleuves, la voile laissera la place à la force du courant lui-même ou à celle du halage humain ou animal et de la rame.

-2 000 à -1 900 ans : les premières infrastructures routière pavées

De véritables routes, accessibles aux plus lourds charrois et reliant directement les principales agglomérations, apparaissent progressivement à l'Antiquité. Dès le 20^{ème} siècle avant JC, en Grèce, comme partout ailleurs, le passage fréquent des hommes et des animaux sur des tracés déterminés par le relief du terrain, la végétation et les points d'eau donna naissance à des pistes, qui devinrent des routes que lorsque « le travail des mains s'ajouta à celui des pieds » pour les régulariser, rendre le sol plus résistant, faciliter l'écoulement latéral des eaux de pluie et le passage des torrents, adoucir les montées et les descentes trop abruptes. Les Romains, bâtisseurs infatigables, seront les plus ardents constructeurs de routes pavées de l'antiquité, le long des axes de commerces. C'est d'ailleurs à eux que l'on doit le mot « route » : la construction d'une voie (via) supposait la « rupture » des obstacles qui se présentaient, d'où le nom via rupta ou, par abréviation, rupta.

Pendant des siècles, les routes romaines bravèrent l'incurie. Puis, peu à peu, démolies, vendues parfois, elles s'effacèrent, sur le sol comme dans le souvenir des hommes. En France, ce n'est qu'au 13^{ème} siècle, à une époque où la monarchie est

consolidée et où le pays connaît une phase de croissance et d'expansion, que le roulage commença à s'organiser et que l'on se préoccupa à nouveau de l'état des routes.

8^{ème} siècle : invention de l'étrier et... premier vol en planeur par l'homme

L'utilisation de l'étrier va rapidement se généraliser avec pour conséquence une révolution technique dans l'art militaire. Alors que la cavalerie, pour importante qu'elle fut dans certaines batailles, n'a jusqu'à présent eu qu'un rôle subalterne par rapport à celui de l'infanterie, ce rapport va maintenant s'inverser. Désormais, le cavalier, bien installé sur sa monture, peut effectuer les mouvements de combat que son instabilité sans étriers lui interdisait, devenant ainsi l'élément essentiel des armées médiévales.

En 875, le chimiste arabo-berbère de Cordoue Abbas Ibn Firnas fait confectionner des ailes en bois recouvertes d'un habit de soie qu'il avait garni de plumes de rapaces. Il se lance d'une tour surplombant une vallée, et, même si l'atterrissage est mauvais (il se fracture les deux jambes), le vol est globalement une réussite : il resta dans les airs pendant une dizaine de minutes. Il fut largement observé par une immense foule qu'il avait par avance invitée.

9^{ème} siècle : invention du collier d'épaule et du fer à cheval

Les grecs et les romains connaissaient la traction chevaline, mais les bêtes étaient attelées par le cou. Ce système limitait ainsi fortement la puissance de traction de l'animal dans la mesure où plus celui-ci tire, plus la sangle comprime le cou et gêne l'animal. Inventé par les chinois dès le 3^{ème}

siècle avant J.C., le collier d'épaule ne se diffusera en Europe qu'à partir du 9^{ème} siècle de notre ère. Il permet d'obtenir de l'animal un rendement trois fois plus élevé puisque la charge est tirée entièrement par la poitrine et les clavicules. A l'origine de cette invention, on peut situer l'expérience des haleurs pour la remontée des bateaux le long des canaux. Avec l'invention du collier d'épaule, on observe le développement, bien que très lent, d'un système régulier de transport en commun.

Durant le Moyen Age et en ce qui concerne les marchandises, 80% des échanges demeurent Toutefois effectués par voie d'eau.

A partir du 12^{ème} siècle, diffusion de la boussole en Europe

En Chine, les propriétés magnétiques sont utilisées par les devins à partir des 2^{ème} siècle et 1^{er} siècle avant J.C., pour fabriquer des tables de divinations magiques. De là, les chinois vont concevoir la première boussole : ils constateront en effet que les cuillères de magnétite utilisées dans les tables de divination pointaient toujours dans la même direction. Il faut cependant attendre à fin du 1^{er} millénaire de notre ère pour que cet objet soit utilisé par les Chinois pour les besoins de la navigation. La boussole se diffuse en Europe à partir du 12^{ème} siècle par l'intermédiaire des Arabes et des Croisés. Son utilisation va constituer une réponse essentielle à la question de la navigation en haute mer. Alors qu'aucun repère terrestre n'est visible, la boussole permet de connaître la direction du Nord. On peut alors facilement comparer la direction du navire avec celle du chemin à suivre.

15^{ème} siècle : création du premier service de transports interurbains par Louis XI

C'est sous Louis XI qu'apparaît le transport public interurbain en Europe avec la création du Service royal de la poste, dont les coches acheminent le courrier et transportent des voyageurs payant leur place.

17^{ème} siècle : invention du taxi par Nicolas Sauvage et des transports en commun urbains par Blaise Pascal

C'est en 1640 que le français Nicolas Sauvage, cocher de son état, ouvre la première entreprise de taxis en Europe, rue Saint-martin, à Paris. Il débute avec un parc de 20 carrosses. Sur la maison de Sauvage, une enseigne représentait saint-Fiacre ; c'est ainsi que l'on prit l'habitude d'appeler fiacres les premières voitures-taxis.

En 1662, le célèbre mathématicien et penseur français Blaise Pascal invente les transports en commun urbains. Il obtient de Louis XIV le privilège de fonder une entreprise de carrosses publics pour l'exploitation de cinq lignes dans la capitale. Les Carrosses à cinq sols connurent un grand succès initial. Mais, alors que les lettres patentes de Louis XIV ne comportaient aucune restriction d'accès quant à la qualité des usagers, le Parlement de Paris, dont les membres anoblis tenaient à marquer leurs privilèges, n'accepta d'enregistrer ces lettres patentes qu'en interdisant l'accès des carrosses à cinq sols aux «soldats, pages, laquais et autres gens de bras ». C'était priver le service d'une part importante de sa clientèle et le rendre impopulaire. Les carrosses publics disparaissent ainsi vers 1677. Il fallut attendre un siècle et demi avant que ne réapparaissent, fortuitement, les transports en commun urbains, pour ne plus disparaître ensuite.

1800-1900 : la machine à vapeur et les transports, victoires et déboires

La mise au point de la machine à vapeur constitue une véritable rupture dans l'histoire des transports en offrant une force motrice dont la puissance est sans commune mesure avec celle générée par la force musculaire ou le vent. Toutefois, l'application de la machine à vapeur au secteur des transports demeurera entravée par les contraintes de cette technique : le volume et le poids du dispositif sont très importants. Dès lors, la machine à vapeur ne connaîtra de véritables succès que dans deux principaux domaines : la propulsion des locomotives ferroviaires et celle des bateaux.

La machine à vapeur et les transports terrestres : l'essor de la locomotive à vapeur se fait au détriment des applications automobiles mais n'empêche pas l'apparition du... vélo

⇒ 1765 : premières utilisations de rails en fonte dans les mines de charbon

Depuis, la fin du Moyen Age, on installait des planches dans les tunnels des mines de charbon afin de faciliter la circulation des brouettes ou wagons. Mais le bois ne résistait qu'un temps au trafic de véhicules lourdement chargés, il fallait remplacer les planches très régulièrement. En 1765, des exploitants de mines anglaises eurent l'idée de poser des rails en fonte, dont la solidité leur conférait une longévité bien plus grande ainsi que la capacité à supporter des charges plus lourdes. C'est l'invention du chemin de fer. Comme la machine à vapeur, celui-ci est liée à la mine de charbon.

⇒ 1769 : expérimentation du fardier à vapeur de Nicolas-Joseph Cugnot ou l'apparition du principe de l'automobile

Le 23 octobre 1769, une expérimentation du fardier à vapeur de Nicolas-Joseph Cugnot a lieu à Paris. Celui-ci a eu l'idée de construire un chariot à trois roues, dont la première est entraînée par une machine à vapeur. Destinée à tirer de lourds fardeaux, d'où son nom, l'intérêt direct de cette machine se révèle cependant limité. Elle manque notamment d'autonomie, ne parvenant à parcourir qu'un ou deux kilomètres avant d'être ravitaillée. Le principe du véhicule automobile – étymologiquement « qui se meut par soi-même » – est cependant acquis.

⇒ 1804 : première expérimentation d'une locomotive à vapeur par Richard Trevithick

En 1803, l'ingénieur anglais Richard Trevithick réussit à effectuer un périple de dix miles dans les rues de Londres avec un énorme véhicule perché sur trois roues, le « London Steam Carriage », un engin à vapeur qu'il a lui-même conçu. Mais, au cours de ces essais, le châssis s'avère trop fragile pour résister aux inégalités de la chaussée. Richard Trevithick songe alors à transposer l'utilisation de son véhicule sur des rails. En 1804, il construit ainsi la première locomotive à vapeur se déplaçant sur des rails (jusqu'à là, les trains étaient tirés par des chevaux). Mais c'est un échec, sa machine se révélant trop lourde pour la voie. L'invention de Trevithick incita toutefois d'autres constructeurs à mettre au point une locomotive opérationnelle. Les locomotives construites en 1812 par John Blenkinsop et en 1814 par William Hedley et George Stephenson permettent de parvenir à une solution fiable.

⇒ 1827 : ouverture de la première ligne de chemin de fer à traction animale d'Europe entre Saint-Étienne et Andrézieux par Louis-Antoine Beaunier

Avant même la mise au point de la locomotive à vapeur, les chemins de fer sont déjà utilisés pour améliorer le rendement des transports terrestres à traction animale. En 1827, la première ligne de chemin de fer d'Europe entre en exploitation entre Saint-Étienne et Andrézieux sous la direction de Louis-Antoine Beaunier alors directeur de l'école des mineurs de Saint-Étienne. Destinée au départ à l'évacuation de la houille vers la Loire, cette ligne sera ouverte aux voyageurs à partir de 1832. La traction animale ne sera remplacée par les locomotives à vapeur qu'à partir de 1844.

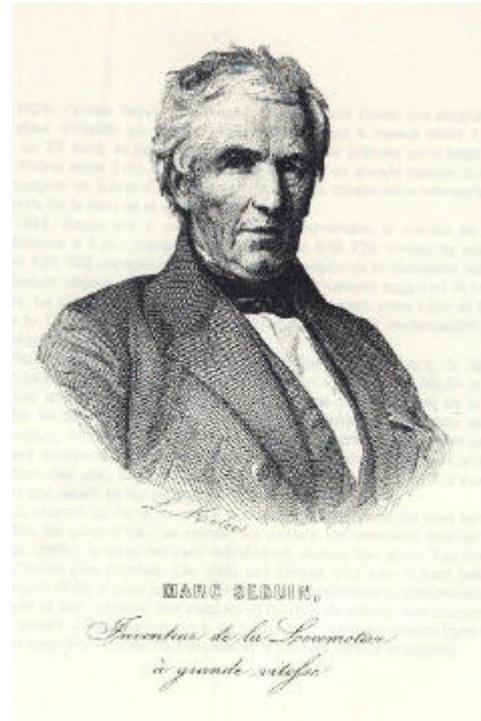
En revanche, les tramways hippomobiles seront utilisés pour plus longtemps pour les transports urbains.

⇒ 1830 : ouverture de la première ligne de chemin de fer à traction à vapeur de France entre Lyon et Saint-Étienne par Marc Seguin

D'abord réservées au transport des minerais, les voies ferrées relient les mines aux canaux, aux ports ou aux usines. Mais la notion de transport de voyageurs sur voie ferrée gagna peu à peu de nombreux adeptes, si bien que le Parlement britannique autorisa, en 1821, la construction d'une ligne réservée aux voyageurs, longue d'environ 40km, entre Stockton-on-Tees et Darlington, et nomma Stephenson ingénieur en chef. L'ouverture de la ligne eu lieu en 1825.

Au cours de la construction de cette ligne de chemin de fer, Marc Seguin, ingénieur français né à Annonay, part en Angleterre en 1823 rencontrer George Stephenson. À son retour, il demande à l'Etat la concession de la construction de la ligne

Saint-Étienne/Lyon par la vallée du Gier. Comprenant des embarcadères à Givors, Rive de Gier et Saint-Chamond, celle-ci fut ouverte progressivement entre 1830 et 1832 ; elle comprend également le premier tunnel ferroviaire de France (Terrenoire).



⇒ 1829 : mise au point de la locomotive à vapeur à chaudière tubulaire par Marc Seguin

C'est sur la ligne Lyon/Saint-Étienne que roulèrent les premières locomotives à vapeur françaises. Elles sont mises au point par Seguin lui-même (1829), sur une base de locomotive de George Stephenson mais équipée de son invention : la chaudière tubulaire qui sextuplait la puissance développée par ces machines. Le principe de la chaudière tubulaire consistait à multiplier les surfaces échauffantes en faisant passer l'air chaud provenant de la combustion à travers une série de tubes plongés dans l'eau de la chaudière. Un bateau à vapeur, pourvu de trois chaudières, munies chacune de quatre-vingts tubes de 4 centimètres de diamètre et de 3 mètres de long, fit plusieurs voyages entre Vienne et Lyon, et lui

permet donc de valider le principe. Dès lors, les locomotives à vapeur à chaudière tubulaire deviendront la référence, offrant une puissance supérieure pour un poids équivalent.

L'ère de la grande industrie débutera à Lyon avec la construction de matériel ferroviaire. Dans son atelier de Perrache, Marc Seguin produit et perfectionne les premières locomotives fonctionnant en France. En 1838, toujours dans les ateliers de Perrache, dirigés alors par l'ingénieur Tourasse, un nouveau modèle à cylindres horizontaux est mis au point. Après le départ de Seguin en 1835, les dirigeants de la Compagnie de chemin de fer de Saint-Étienne à Lyon abandonnent la construction des locomotives et du matériel roulant qu'ils confient à Verpilleux et Clément-Desormes. Depuis 1820, le givordain Verpilleux possède un atelier de réparation de machines à vapeur à Rive de Gier. Rapidement, Verpilleux construit lui-même ses machines à vapeur en déposant de nombreux brevets (ex : locomotive à roues couplées). Il développe également les applications de la machine à vapeur destinées à l'entraînement de machine-outil. En 1839, il invente notamment une locomotive à roues couplées assez puissantes pour affronter les fortes pentes de la ligne Lyon/Saint-Étienne au niveau de Saint-Chamond. Alphonse Clément-Desormes est quant à lui le fondateur des Ateliers de construction et forges d'Oullins en 1844. La construction ferroviaire lyonnaise comptera un autre acteur important avec les Chantiers de la Buire fondés en 1847 par J.Frossard de Saugy, un des promoteurs avec Paulin Talabot, du chemin de fer de Lyon à Marseille. Ces chantiers étaient spécialement équipés pour la construction de wagon. L'essor de la construction ferroviaire lyonnaise est fortement lié à celui des hauts-

fourneaux et des aciéries de la Loire, prospérité qui durera jusqu'aux années 1880.

L'essor des transports terrestres par voies ferrées et locomotives à vapeur est fulgurant. Le réseau mondial passe de 150 000 kms en 1850 à 1 million en 1915. En France, la construction du réseau de chemin de fer est encouragé par la loi du 11 juin 1842, qui définit le partage des tâches entre l'Etat (qui construira les infrastructures et les ouvrages d'art) et les compagnies privées (qui se chargeront de l'édification des bâtiments, la pose des voies, la fourniture du matériel roulant). La région lyonnaise bénéficie de la création en 1856 de la compagnie du Paris-Lyon-Méditerranée, issue de la fusion de des compagnies du Paris-Lyon, du Lyon-Méditerranée, du Lyon-Genève, du Bourbonnais, du Rhône-et-Loire...

Le chemin de fer devint un rouage essentiel de l'industrialisation qui nécessitait le déplacement rapide des marchandises et de la main d'œuvre. Au début en concurrence avec le transport fluvial, le chemin de fer s'imposa rapidement grâce à la machine à vapeur, à l'amélioration de la voie et à la possibilité de construire des lignes de chemin de fer là où les canaux étaient impraticables. L'essor du chemin de fer constitue aussi un des premiers cas de développement d'une filière technique entraînant à la fois des conséquences irréversibles et de grande ampleur pour le paysage et l'apparition de risques d'une grande gravité (explosion de chaudière, déraillement ou collision).

⇒ 1831 : invention de l'autobus à vapeur par Walter Hancock

D'autres inventeurs espèrent toujours exploiter les aptitudes de la machine à vapeur pour la propulsion de véhicules sur les routes. En 1831, l'anglais Walter Hancock dota son pays du premier autobus

à moteur à vapeur. Pouvant transporter 10 passagers, il fut mis en service entre Stratford et la City de Londres. Mais ces efforts pour mettre au point ce type de véhicules connaissent un coup d'arrêt à partir de 1836, date à laquelle les autorités britanniques décident de donner la priorité au chemin de fer en décourageant les transports par automobiles à vapeur : le « locomotive act » impose que tout véhicule motorisé soit précédé d'un homme à pied agitant un drapeau rouge.

La mise au point d'automobiles à vapeur sera également l'objectif de plusieurs ingénieurs français. Après avoir entrevu les possibilités de la machine à vapeur à l'occasion de l'exposition universelle de Paris de 1867, le manceau Amédée Bollée, à l'origine fondeur de cloches, est ainsi le premier industriel français à tenter de mettre au point et à produire en grande quantité des automobiles à vapeur, durant les années 1870 à 1890. Il commercialisa sa première « locomotive routière », pouvant transporter douze personnes, en 1872. Bollée conçoit ensuite un omnibus à vapeur (en 1876) dont les 4 roues sont motrices et directrices, puis une voiture plus légère (2,7 tonnes) que son premier modèle, qui dépasse facilement les 40 km/h (1878). Les commandes affluent de toutes parts, d'Allemagne tout particulièrement où une filiale Bollée voit même le jour en 1880. Bollée part alors à la conquête du monde et présente ses modèles de Moscou à Rome, de Syrie en Angleterre (1880-1881). Un nouveau modèle est lancé en 1880, doté de six places, d'une boîte de vitesse à deux rapports, d'un moteur à vapeur de 15cv. En 1881, un modèle «La Rapide » de six places pouvant atteindre 63 km/h est proposé.

Amédée Bollée est rejoint dans sa démarche par Léon Serpollet, originaire de Culoz dans l'Ain. Il met

au point son premier tricycle à vapeur en 1888. Il travaille toutefois principalement pour les industriels qui s'engagent dans l'aventure automobile tels que Peugeot, lequel lance un tricycle équipé d'un moteur à vapeur Serpollet en 1889.

Au final, la propulsion à vapeur s'avèrera une impasse en matière de rapport poids/performance. Le moteur à explosion mis au point à la même époque finira par s'imposer définitivement.

⇒ 1862 : mise en service du premier funiculaire au monde à Lyon

Le site élevé du plateau de la Croix-Rousse rendait son accès malaisé. Pendant des siècles, tout le trafic emprunta la Grand'Côte, ancienne voie romaine, pénible à grimper et dangereuse à descendre. En 1859, les ingénieurs Lyonnais Auguste Molinas et Henri Pronier fondent la Compagnie du Chemin de fer de Lyon à la Croix-Rousse. Ils proposent de relier la presqu'île au plateau de la Croix-Rousse grâce à un chemin de fer montant de front la pente selon un principe simple : deux voitures reliées par un câble montent et descendent sur des voies parallèles, chacune servant alternativement de contrepoids à l'autre. Les deux ingénieurs obtiennent une concession pour une ligne reliant la rue du Jardin des Plantes au Boulevard de la Croix-Rousse. Au moment de son inauguration en 1862, la « ficelle » de la rue Terme est ainsi le premier funiculaire transportant des voyageurs et le premier métro jamais construit au monde.

⇒ 1863 : mise en service du premier métropolitain à vapeur à Londres

Le premier chemin de fer urbain souterrain fut inauguré en 1863 à Londres. Cette première ligne couvrait 6,4 kms et la traction était à vapeur. Après

l'ouverture de plusieurs autres tronçons, le réseau métropolitain londonien est électrifié en 1890.

⇒ *1817-1888 : invention du vélocipède*

En 1817, l'allemand Karl Drais obtient un brevet pour sa Laufmaschine ou « machine à courir », que les français appelleront la draisienne. Cet engin possédait deux roues alignées, reliées à un cadre en bois par des fourches, la roue avant pouvant pivoter latéralement. Assis sur le cadre, l'utilisateur devait prendre appui au sol pour fournir une poussée. En juillet 1817, pour démontrer l'intérêt de son invention, Drais parcourt en quatre heures les 50 kms qui séparent Mannheim de Kelh alors qu'une diligence fait le trajet en douze heures. Bien que connaissant un certain succès, en particulier au Royaume-Uni et aux États-Unis, la Draisienne demeurera un jouet plus qu'un véritable véhicule.

Il faut attendre 1861 pour que renaisse cette première invention tombée en désuétude sous une forme présentant un intérêt bien supérieur. Cette année là, un chapelier apporte à Pierre Michaux, serrurier originaire de Bar-le-Duc, une draisienne à la roue avant défaillante pour réparation. L'un de ses fils Ernest l'essaye et se plaint du désagrément qu'il éprouve une fois lancé pour garder les jambes levées. Le père a alors l'idée de fixer une double manivelle sur le moyeu de la roue avant, disposée de manière telle que la personne assise sur le vélocipède puisse actionner ces pédales avec les pieds. C'est nettement plus rapide que la draisienne et surtout plus agréable. Dès 1861, la société Michaux fabrique et vend deux exemplaires de ce nouveau type de vélocipède. L'année suivante, elle en vend 142 et 400 en 1865. En 1867, Michaux présente son vélocipède à l'exposition universelle de Paris. La société Michaux deviendra dans la

foulée l'une des plus importantes manufactures de vélocipèdes au monde.

Plusieurs autres inventions vont achever de donner au vélo sa physionomie actuelle. En 1869, le français André Guilmet fit construire un vélocipède dont les pédales, situées dans la position centrale actuelle, étaient en liaison avec une chaîne qui transmettait le mouvement à la roue arrière. Malheureusement André Guilmet fut tué pendant la guerre de 1870 et sa machine, peut-être trop en avance, resta à l'état de prototype et n'eut aucune descendance industrielle. En 1879, l'anglais Harry Lawson relança l'idée ; elle fut réalisée par l'industriel John Starley qui présenta en 1885 la Rover Safety.

Le montage en France de la première bicyclette de ce type sera effectué à Saint-Étienne par les frères Pierre et Claudius Gauthier. En 1888, John Boyd Dunlop invente le pneumatique. En 1897, Jean Fasano, alors sous-directeur de la Manufacture française d'armes et cycles de Saint-Étienne, adapte le principe de la roue libre, qu'il a conçu quelques années plus tôt pour améliorer les machines servant à la fabrication d'armes de chasse, au vélo. La même année, il incorporera également deux nouvelles inventions : le système à deux chaînes et le changement de vitesse. C'est Paul de Vivie, autre stéphanois (d'adoption), qui popularisera le dérailleur, dans sa revue « Le cycliste » (1887-1973).

Ainsi conçu, le vélo connaîtra un important succès, devenant le mode transport individuel dominant. Ce succès entraîne des changements non négligeables dans le fonctionnement de la société. La bicyclette a en effet procuré aux femmes une mobilité sans précédent, facilitant ainsi leur émancipation. Dans les années 1890, l'engouement pour le cyclisme

chez les femmes a été à l'origine de la création d'une mode de vêtements comme les jupes-pantalons qui ont aidé les femmes à se libérer du corset et d'autres vêtements contraignants. Par ailleurs, en ville, les bicyclettes ont réduit la concentration de population du centre-ville en donnant aux travailleurs un moyen d'effectuer des déplacements pendulaires entre des habitations individuelles en banlieue proche et les lieux de travail de la ville. Le recours aux chevaux a également diminué dans la même période. Enfin, combinée aux congés, la bicyclette permit aux gens de voyager dans leur pays.

La machine à vapeur et les transports maritimes : les bateaux à vapeur supplantent progressivement les bateaux à voile

⇒ 1707 : inventeur de la première véritable machine à vapeur, Denis Papin tente d'équiper un bateau

En 1707, Denis Papin est le premier à équiper un bateau d'une machine à vapeur associée à une roue à aubes. Construit en Allemagne, ce prototype sera détruit par des bateliers avant de pouvoir faire ses preuves.

En 1736 le mécanicien anglais Jonathan Hulls tenta lui aussi de mettre à l'eau un bateau fonctionnant à la vapeur, sans le moindre succès.

⇒ 1777 : premier bateau à coque métallique en Angleterre

L'idée que le fer est plus lourd que le bois, puisqu'il ne flotte pas, a longtemps empêché d'utiliser ce matériau pour construire des coques de navire. Le premier bateau en fer date de 1777. Mesurant que 4 mètres, ce canot fut fabriqué en Angleterre.

C'est surtout à partir du 19^{ème} siècle que l'on comprit les potentialités de l'acier pour la

construction de navires. À solidité égale, une coque en acier est plus légère qu'une coque en bois. À poids égal, le bateau en acier sera plus grand et portera plus lourd. De plus, le développement de la machine à vapeur montrera la mauvaise cohabitation des chaudières avec les structures en bois.

⇒ 1783 : première navigation au monde d'un bateau à vapeur à roue à aubes sur la Saône au niveau de Lyon

Construit par le mécanicien Frèrejean à Vaise à la demande du comte Claude de Jouffroy d'Abbans, le « Pyrocaphe » était muni d'une machine à vapeur de Watt. En 1783, ce bateau réalise une première mondiale en remontant la Saône pendant un quart d'heure, de l'Archevêché de Lyon (situé à l'époque à côté de la cathédrale) à l'île Barbe. Claude de Jouffroy d'Abbans avait d'ailleurs réussi dès 1778 à faire naviguer un bateau à vapeur à rame.

⇒ 1807 : construction du premier vapeur de rivière par Robert Fulton

Mais c'est en Amérique du nord que la navigation à vapeur allait connaître ses plus grands perfectionnements. En 1787, John Fitch et James Rumsey s'essayent à la démonstration d'un bateau à vapeur à rames, sans grands succès.

Il faut attendre 1807 pour voir la construction du premier vapeur de rivière commercial par l'américain Robert Fulton à New York. Dénommé *Clermont*, ce navire assura pendant quelques années une ligne régulière entre New York et Albany.

⇒ 1819 : première traversée transatlantique d'un bateau à vapeur par Moses Rogers

En 1818, le capitaine américain Moses Rogers, de Savannah (Géorgie), projeta de faire construire un bateau à vapeur destiné à un service régulier entre

l'Amérique et l'Europe. Le Savannah partit de son port en 1819 pour atteindre en 25 jours Liverpool. L'utilisation de la vapeur pour la propulsion des navires est lancée. Le 19^{ème} siècle sera ainsi celui de la diffusion des bateaux à vapeur au détriment des bateaux à voiles pour le transport commercial de passagers et de marchandises. En 1900, les trois quarts du tonnage mondial sont constitués de navires à vapeur.

⇒ 1825 : tentative de mise en œuvre d'un système de halage à la vapeur sur le Rhône entre Lyon et Arles

Au moment où il entreprend la construction de la ligne de chemin de fer entre Lyon et Saint-Étienne, Marc Seguin aspire également à fonder une société de transport fluvial sur le Rhône à partir d'une idée de halage à vapeur. Après un voyage à Genève en 1823, pour l'établissement des ponts suspendus, Marc Seguin observe un bateau à vapeur. Il conçoit dès lors son emploi possible pour remonter le Rhône, tout en s'appuyant sur un brevet déposé par son oncle Pierre-François de Montgolfier, le principe du halage sur points fixes. Seguin fonde en 1825 une société de halage par la vapeur sur le Rhône : la société Seguin, Montgolfier, d'Ayme et Cie. Elle officiera entre Arles et Lyon, et comprendra plusieurs bateaux, dont le « Ville d'Annonay » qui sort du chantier d'Andance en 1824. Un second « Le Voltigeur » est mis à flot. Les deux premières machines à vapeur sont achetées à Londres fin 1825 chez Martineau-Taylor, sur la base de plans et de concepts émis par Marc Seguin en 1825. Malheureusement celles-ci sont alors de puissance bien insuffisante. Bien que finalement voué à l'échec, ce projet conduira Marc Seguin à proposer des améliorations de la machine à vapeur

dont l'application à la traction des locomotives à vapeur se révéleront décisives.

Il faudra attendre 1827 et les initiatives d'un américain établi en France, Edward Church, pour que démarre véritablement l'exploitation commerciale de la navigation à vapeur sur la Saône. Cette année là, il crée avec d'autres investisseurs lyonnais la Société anonyme des bateaux à vapeur sur la Saone, société qui proposera des rotations entre Lyon et Macon. En 1829, le même groupe d'investisseurs décide de lancer le même type d'activité sur le Rhône. Ils créent pour ce faire la Compagnie générale de navigation et organise un voyage d'essai entre Lyon et Arles avec le « Pionnier ». Devenue Compagnie générale de navigation Le Havre-Paris-Lyon-Marseille, cette entreprise sera la première compagnie de navigation intérieure de France au milieu du siècle. Dans ce contexte, plusieurs chantiers de construction navale s'établissent à Lyon. Mais l'embellie est de courte durée en région lyonnaise où la concurrence du chemin de fer s'exerce précocement.

⇒ 1863 : Mise en service de la première ligne de transports urbains fluviaux de France à Lyon

En 1862, deux lyonnais, Plasson et Chaize obtiennent l'autorisation d'exploiter une ligne de bateaux omnibus sur la Saône entre La Mulatière et Vaise. Pour cette entreprise, ils font construire cinq bateaux d'un type spécial aux chantiers navals de la Felizat, dans le quartier de la Mouche, d'où le nom qui leur sera donné. Mises en service en 1863, les Mouches de la Compagnie des bateaux-omnibus offrent alors une ponctualité sans défaut, accostant toutes les 10 minutes à l'un des vingt-cinq embarcadères disposés de chaque côté de la Saône. Très bon marché, les bateaux mouches

connaissent un succès tel qu'ils font chuter la fréquentation des omnibus à chevaux. De 1863 à 1910, les bateaux-mouches de Lyon transporteront jusqu'à quatre millions de passagers chaque année (années 1871 et 1905) avant de disparaître vers 1910 sous la concurrence des tramways électriques.

Les fondateurs des bateaux-mouches lyonnais n'en resteront pas là. En 1867, à l'occasion de l'Exposition universelle, Emile Plasson gagne le concours ouvert par la ville de Paris pour une desserte de la ville par bateaux. Il propose un modèle de bateau à hélice bien adapté au lit irrégulier de la Seine, et obtient la concession d'exploitation. Il commande aux chantiers lyonnais de La Buire 30 bâtiments qui gagneront Paris par voie d'eau. La Compagnie des bateaux-omnibus de Paris est créée. Elle exploite, durant cinq ans sans concurrence, la traversée de Paris et un service de banlieue limité à Charenton et Suresnes.

La machine à vapeur et les transports aériens : la première ne participe qu'aux premiers balbutiements des seconds

⇒ 1782 : invention du premier aéronef par les frères Montgolfier à Annonay

La montgolfière a été inventée par les frères Montgolfier, Joseph et Étienne, en 1782. Cette année-là, Joseph de Montgolfier, fabricant de papier à Annonay (Ardèche), qui souhaitait réchauffer sa chemise en raison du froid, alluma un feu de papier dans sa cheminée. Il serra le col du vêtement tout en évasant les pans afin d'y concentrer la chaleur. Se gonflant sous l'effet de l'accumulation de l'air chaud, la chemise s'éleva au-dessus du foyer. Joseph confia ses observations à son frère Étienne et tout deux se mirent au travail pour réaliser ce qui

deviendra la première montgolfière. La première expérience publique eut lieu le 4 juin 1783 à Annonay. Il s'agit d'un grand ballon (environ 11 mètres de diamètre), formé de toile et de papier, contenant de l'air chauffé, auquel est suspendue une nacelle dans laquelle est fixé un réchaud. L'air chaud étant plus léger que l'air froid, il monte sous la poussée aérostatique (poussée mise en évidence, dans les liquides, par Archimède), et entraîne l'ensemble. Le 19 septembre 1783, un coq, un mouton et un canard firent l'expérience du premier vol habité à Versailles devant le roi Louis XVI. Le 23 novembre de la même année, à Paris, François Pilatre de Rozier et François d'Arlandes (originaire d'Anneyron) s'embarquent dans une montgolfière pour le premier vol libre de l'histoire. À noter que la lyonnaise Elisabeth Thible fut la première femme à voler en ballon le 4 juin 1784 à Lyon, au-dessus du parc des Brotteaux.

⇒ 1852 : invention du premier ballon dirigeable par Henri Giffard

Les ballons rendaient divers services depuis déjà plus d'un demi-siècle. Mais leur intérêt demeurait limité par le fait qu'ils devaient rester captifs, c'est-à-dire reliés au sol par des câbles, sans quoi le vent les entraînait littéralement n'importe où. D'où l'idée de les munir d'un moteur embarqué faisant tourner une hélice, ce qui leur permettrait de se mouvoir indépendamment de la direction du vent. Mais le poids considérable des machines à vapeur, seuls moteurs disponibles, impliquait la construction de ballons de très grandes dimensions. Le premier dirigeable fut construit par Henri Giffard et parcourut une distance de 27 km entre Paris et Trappes lors de son premier vol en 1852. C'est sous l'impulsion de Giffard que le dirigeable prendra la configuration

qu'on lui connaît encore aujourd'hui : celle d'un ovoïde allongé à axe horizontal.

⇒ 1900 : invention du premier ballon dirigeable muni d'un moteur à explosion par Ferdinand Von Zeppelin

L'invention du moteur à explosion va permettre au dirigeable de faire des progrès fulgurants. Progrès qui amèneront le comte allemand Ferdinand von Zeppelin à concevoir le premier dirigeable à moteur à explosion dont le premier vol aura lieu en 1900. Mais Zeppelin doit cependant attendre la fin des années 1900 pour que sa technologie devienne véritablement fiable et fasse l'objet d'un développement commercial. Zeppelin fonde d'ailleurs la première compagnie de transports aériens au mode en 1909. Le dirigeable Zeppelin connaîtra son apogée durant les années 1920 et le début des années 1930, avant que des accidents et l'arrivée au pouvoir des nazis ne remettent en cause son dynamisme. D'une manière générale le principe de l'aérostation était remis en question par le développement des avions bénéficiant eux aussi de l'arrivée du moteur à explosion.

⇒ 1800-1890 : les planeurs, premiers aéronefs « plus lourds que l'air »

A côté des aéronefs « plus légers de l'air », le 19^{ème} siècle a vu la multiplication des tentatives pour concevoir des objets « plus lourds que l'air » capables de voler, à l'image des oiseaux eux-mêmes plus lourds que l'air. Le développement du principe de portance de l'air conduira de nombreux aventuriers du ciel à fabriquer divers planeurs.

Parmi les nombreux pionniers du vol en planeur, Louis Mouillard est de ceux qui ont fortement contribué à l'élaboration d'une véritable réflexion scientifique en matière d'aéronautique. Né à Lyon en 1834, il découvrit sa vocation le jour où il

observa le lent tournoiement d'un rapace, ailes déployées. Persuadé que la clé du vol humain se trouvait dans une meilleure connaissance des oiseaux, il construisit, en cachette de sa famille, une machine volante, hybride de parachute et d'oiseau, à l'aide de vieux parapluie. Un sacristain intervint à temps pour l'empêcher de se jeter du haut de l'église de Fourvière. En attendant de pouvoir poursuivre sa quête, il s'inscrivit à l'école des beaux arts de Lyon, où son obsession pour les oiseaux ne cessait d'étonner ses maîtres. En 1856, Louis Mouillard renonce à ses études d'art pour s'installer en Algérie. Il acheta des Pétrels – des oiseaux de mer dont l'envergure dépasse parfois 1,25 m – et s'en inspira pour fabriquer un planeur en forme d'oiseau de 12 m d'envergure environ. Pour son premier essai, il choisit un remblai très surélevé au-dessus des champs. Le vent soufflait fort. Il fixa son planeur sur son corps, courut à la façon du Pétrel et s'élança dans le vide. Il vola pendant quelques secondes, sur une quarantaine de mètres. Cette activités d'observation du vol des oiseaux et de conception de planeurs conduiront Louis Mouillard à publier un recueil de ses théories en 1881 : « l'empire de l'air ». Ses travaux précurseurs intéressèrent fortement les autres aventuriers du ciel de l'époque, et notamment Octave Chanute (français naturalisé américain) avec lequel il entretiendra une correspondance nourrie. Par son intermédiaire, Mouillard contribuera de façon posthume à rendre possible le premier vol d'un avion à moteur à explosion de l'histoire réalisé en 1903 par les frères Wright, Chanute étant leur conseiller. Louis Mouillard imaginait déjà que le véhicule aérien de l'avenir serait un vaste « oiseau » propulsé par une hélice. Il avança même l'idée de modifier, au cours du vol, la forme de

l'appareil afin de faciliter sa pénétration dans l'air : il posa là les fondements de la géométrie variable appliquée aux avions de chasse des années 1970-1980.

⇒ 1890 : *premier vol d'un avion motorisé par Clément Ader*

Tout au long du 19^{ème} siècle, le passage du planeur à l'aéroplane se heurte à trois difficultés majeures : l'absence de moteur léger suffisamment puissant, une définition encore imprécise des propriétés sustentatrices de l'aile et l'incontrôlabilité du vol.

Parmi ceux qui affrontent ces difficultés, il y a Clément Ader. Lui aussi commença à s'intéresser à l'aviation en étudiant le vol des oiseaux et des chauves-souris. En 1873, il construit un planeur en forme d'oiseau recouvert de plumes d'oies. Il enchaîna avec un projet plus élaboré, l'« Eole », propulsé par une machine à vapeur. L'engin vola sur une courte distance en 1890, lui permettant de devenir le premier homme à avoir volé avec un avion. Mais son avion restait incontrôlable et peu aérodynamique. L'expérience qu'il tentera quelques années plus tard avec l'Avion III sera un échec, le conduisant parmi d'autres raisons à renoncer à ses recherches en matière d'aéronautique.

La suite de la grande aventure de l'aéronautique s'établira sur la base d'un autre choix de motorisation désormais possible : le moteur à explosion.

1860-1900 : le moteur à explosion et le moteur électrique, invention des vecteurs énergétiques centraux des transports au 20^{ème} siècle

Ce demi-siècle constitue une période cruciale au regard du fonctionnement actuel de notre système de transport. C'est en effet pendant la deuxième

moitié du 19^{ème} siècle que sont mis au point les vecteurs énergétiques qui seront au cœur du modèle de développement industriel du siècle suivant.

1860-1907 : mise au point du moteur à explosion et première application à l'automobile et à l'aviation

⇒ 1860-1864 : *mise au point du premier moteur à explosion par Etienne Lenoir et Nicolas Otto*

Bien que le pétrole tende à être préféré au gaz pour l'éclairage, c'est une autre forme d'utilisation qui va créer sa légende (l'or noir) : le moteur à explosion.

Les premiers travaux de thermodynamique – science de tous les phénomènes qui dépendent de la température et de ses changements – durant la première moitié du 19^{ème} siècle, ont démontré que le rendement des machines thermiques, quel qu'en soit le type, dépendait du niveau de la température produite. Mais ces analyses avaient aussi montré que la vapeur pénétrant dans le cylindre ne véhiculait qu'une petite partie de la chaleur produite par la combustion du charbon. Est alors apparue l'idée de placer la source chaude directement dans le cylindre : il fallait construire des machines à combustion interne et non plus externe.

Le premier moteur à combustion interne fut l'œuvre d'Etienne Lenoir, ingénieur français d'origine Belge. En 1860, il obtient un brevet pour la construction d'un système reprenant l'ensemble cylindre-piston et toute la mécanique des machines à vapeur (notamment pour la transmission), mais dont le fonctionnement est basé sur l'introduction dans le cylindre de l'air qui est ensuite réchauffé par la combustion interne d'une petite quantité de gaz d'éclairage dont l'allumage est obtenu par une

étincelle électrique. Il y a en somme deux inventions : celle du moteur à gaz et celle de l'allumage électrique du mélange air-gaz.

Toujours en 1860, un ingénieur italien propose de remplacer le gaz par du pétrole pour alimenter les moteurs à combustion interne. Ce n'est encore qu'une idée, mais elle fera long feu.

En 1862, Alphonse Eugène Beau dit Beau de Rochas décrit l'idée d'un moteur à combustion interne fonctionnant en quatre temps. Le cycle commence à un point mort haut, quand le piston est à son point le plus élevé. Pendant le premier temps le piston descend (admission), un mélange d'air et de carburant est aspiré dans le cylindre via la soupape d'admission. Dans un deuxième temps, la soupape d'admission se ferme, le piston remonte (compression) comprimant le mélange admis. Dans un troisième temps, le mélange air-carburant est enflammé, habituellement par une bougie d'allumage, aux environs du deuxième point mort haut (remontée complète du piston). L'expansion des gaz portés à haute température lors de la combustion force le piston à descendre pour le troisième temps (détente). Ce mouvement est le seul temps moteur (produisant de l'énergie directement utilisable). Lors du quatrième et dernier temps (l'échappement) les gaz brûlés sont évacués du cylindre, via la soupape d'échappement, par la poussée de la remontée du piston.

En 1864, l'ingénieur allemand Nicolas Otto est le premier à commencer l'industrialisation du moteur à quatre temps décrit par Beau de Rochas. Ses moteurs fonctionnant au gaz commencent à concurrencer la machine à vapeur dans la production industrielle. Leurs avantages sont : la compacité, l'absence de stockage du combustible

(une arrivée de gaz suffit), une mise en route instantanée.

⇒ 1878 : mise au point du moteur à explosion à deux temps par Carl Benz

Alors que dans le moteur à quatre temps, il y a un temps moteur et trois autres temps qui consomment du travail plutôt que d'en fournir, dans le moteur à deux temps, il n'y a que deux moments : la montée du piston, qui est le temps inactif, pendant lequel l'air est comprimé et va se mélanger au gaz carburant ; puis la descente du piston, après l'explosion du mélange air-carburant, au cours de laquelle, d'une part, un travail est fourni à la bielle et, d'autre part, les gaz de combustion sont évacués.

⇒ 1884-1886 : invention de la première automobile mue par un moteur à explosion par Édouard Delamare-Deboutteville et Carl Benz

En 1884, Édouard Delamare-Deboutteville déposa un brevet d'invention ayant pour titre « moteur à gaz perfectionné et son application aux véhicules ». La même année il apparût à Fontaine-le-Bourg aux commandes d'un tricycle propulsé par un moteur à gaz. Mais le véhicule n'est pas encore parfaitement au point : le tuyau d'alimentation a tendance à éclater sous la pression du gaz.

L'Allemand Karl Benz le remplace par un carburant d'emploi plus commode : l'essence obtenue par distillation du pétrole. En 1886, à Mannheim, la firme « Benz & Co », fondée par Karl Benz en 1883, parvient ainsi à faire rouler un tricycle à essence. La même année, un autre allemand, Gottlieb Daimler invente une calèche à moteur.

⇒ 1885 : invention de la bougie d'allumage par Etienne Lenoir

L'automobile telle que nous la connaissons aujourd'hui repose sur différentes avancées

techniques qui ne se résument pas au moteur à explosion. Ainsi, en 1885, Etienne Lenoir livre sa deuxième invention majeure en matière d'automobile : la bougie d'allumage électrique, très proche de celles que nous utilisons encore aujourd'hui.

⇒ *1888 : invention du pneumatique par John Boyd Dunlop*

Assez rapidement, les fabricants de vélocipèdes avaient trouvé utile d'entourer les roues d'un bandage en caoutchouc, afin d'absorber les chocs, étant donné l'élasticité de ce matériau. L'idée de Dunlop, c'est de remplacer le classique bandage par un tube creux en caoutchouc que l'on peut gonfler d'air et fermer hermétiquement après gonflage. Le système est nettement plus confortable. Bientôt, la bicyclette, puis l'automobile, vont constituer un important débouché pour l'industrie du caoutchouc, qui va se développer considérablement.

En 1891, les frères André et Edouard Michelin, fabricants de produits en caoutchouc, inventent le pneumatique démontable : un tube de caoutchouc fin muni d'une valve installé dans un autre tube plus épais et résistant. Dès lors, le pneumatique va s'imposer définitivement pour la conception des roues de vélo et d'automobile.

⇒ *1891 : début de la production d'automobiles équipées de moteur à explosion en France*

Les moteurs à essence présentés lors de l'Exposition universelle de Paris en 1889, à côté de voitures à vapeur, séduisent des industriels français, tels Panhard-Levassor et Peugeot, qui en achètent la licence. Ainsi, à partir de 1890, l'automobile à essence vient concurrencer l'automobile à vapeur. Même si l'une comme l'autre

constituent à l'époque un luxe, la production française d'automobiles connaît une croissance rapide ; à l'orée du 20^{ème} siècle, la France est le premier producteur mondial d'automobiles devant les Etats-Unis. En décembre 1899, la revue « Scientific american » publie une statistique significative : alors qu'il ne circule que 688 voitures aux Etats-Unis, on en dénombre 6 546 en France, 478 en Belgique, 434 en Allemagne, 412 en Grande-Bretagne. En 1900, le plus important producteur d'automobile au monde se trouve cependant en Allemagne : il s'agit de Benz avec 603 unités.

La production d'automobile en région lyonnaise débute en 1893 avec Émile Lavirotte et Maurice Audibert qui ouvrent un atelier de construction automobile d'une vingtaine d'ouvriers, dans le quartier Monplaisir de Lyon. Ils sortent leur premier modèle, une voiture à moteur horizontal et transmission par courroie. Jusqu'en 1896, les deux associés ne vont produire que quelques voitures sur demande puis, devant l'accroissement des commandes, l'usine sera étendue pour atteindre 10 000 m² et 500 ouvriers en 1898.

A la même époque, à partir de 1894, deux autres jeunes lyonnais passionnés de mécanique, Théodore Schneider et Edouard Rochet, investissent les bénéfices de leur atelier de construction de cycles dans l'aventure de l'automobile. En 1896, ils se lancent à l'assaut du Galibier au volant d'une voiture de leur marque. L'ascension est un succès d'autant plus remarquable que le sentier rassemblait sur 8kms des difficultés apparemment insurmontables pour l'époque : pente moyenne de 12%, sols caillouteux et ravinés, etc. Cette performance semble avoir marqué non seulement Rochet Schneider mais

l'ensemble de la construction lyonnaise. La proximité des Alpes avec leurs routes sinueuses en continuelles dénivellations a conduit les fabricants à perfectionner des points essentiels : réduction du rayon de braquage, visibilité, réserve de puissance, utilisation rationnelle du moteur par le choix de démultiplications appropriées, freinage très efficace... Dès 1900, cette réputation de sérieux et de robustesse dépasse largement la région du Rhône et la presse spécialisée de l'époque parle alors de « L'école automobile lyonnaise ».

Cette réputation naissante de la construction automobile lyonnaise s'affirmera véritablement avec l'émergence d'une autre entreprise. Après avoir construit une première voiture entre 1893 et 1895, Marius Berliet fonde sa société en 1899. A la fin de cette première année, l'entreprise de Marius Berliet a construit 6 voiturettes et emploie 4 ouvriers. 12 voitures seront produites l'année suivante. Par leur simplicité et leur robustesse, ses différents modèles 10 et 16 ch rencontrent dès le début leur clientèle. A la fin de l'année 1902, l'usine sort 10 à 15 voitures par mois et emploie 250 personnes. Pour en arriver à ce stade de la production, il a dû changer plusieurs fois de locaux, absorbant notamment l'entreprise Audibert et Lavirotte. En quelques années seulement, la société Berliet est devenue l'un des principaux constructeurs automobile français.

L'année 1904 voit les premières participations des voitures Berliet aux compétitions automobiles. Elles glaneront, en 1905, plus de 25 premiers prix auxquels s'ajoutent différents prix d'élégance pour leurs qualités et leur esthétique. Cette même année, l'intérêt croissant suscité par la production Berliet se concrétisera par deux événements. D'une part, la présidence de la République adopte les

voitures Berliet. D'autre part, et de façon encore plus significative, la société américaine de fabrication de locomotives à vapeur « American Locomotive Company » (ALCO) de Broadway plébiscite la marque Berliet pour inspirer la mise en place de sa nouvelle branche d'activité consacrée à la fabrication automobile. Ayant essayé les meilleurs châssis français, allemands et anglais, l'ALCO constate que ce sont les véhicules Berliet qui présentent les meilleures qualités d'endurance, de robustesse et de simplicité. Elle propose alors 500 000 francs or à Marius Berliet afin d'acquérir une licence pour fabriquer et commercialiser ses voitures outre-Atlantique. Cet apport financier permet à Marius Berliet d'opérer une inflexion dans sa stratégie de développement vers des modes de production véritablement industriels.

⇒ 1893 : invention du moteur diesel par
Rudolph Diesel

Le moteur diesel se caractérise par une absence d'allumage électrique commandé. Il est construit de telle manière que le mélange combustible-air soit fortement comprimé, au point d'atteindre la température d'inflammation spontanée. Le moteur diesel a deux avantages. Il est d'un meilleur rendement que le moteur à explosion et il peut être construit de manière à produire de très grandes puissances. De plus, il peut brûler des combustibles nettement plus lourds (et donc moins chers) que ceux qui sont utilisés dans les différentes sortes de moteurs à explosion. Par contre, il est de construction nettement plus lourde, devant résister à de très fortes pressions. Ce sera donc le moteur idéal pour la motorisation des camions, des locomotives et des bateaux. Ainsi, en 1950, les moteurs diesel équipaient presque la totalité des

navires, les turbines à vapeur ne pouvant les concurrencer que pour les très gros vaisseaux.

⇒ *1898 : invention de la boîte de vitesses par Louis Renault*

1898 est l'année de la création de la société de construction automobile Renault, de la fabrication de la première voiture de la marque, équipée de la première boîte de vitesse à prise directe brevetée par Louis Renault.

⇒ *1903 : invention de la ceinture de sécurité par Gustave Désiré Liebau*

La ceinture de sécurité que nous connaissons aujourd'hui est dérivée du brevet déposé en 1903 par le français Gustave Désiré Liebau. C'est toutefois seulement en 1973 que la ceinture de sécurité sera rendue obligatoire en France sur les véhicules de tourisme.

⇒ *1905 : premier vol soutenu d'un avion muni d'un moteur à explosion*

Après avoir construit un moteur à essence adapté pour l'avion, les frères Wilbur et Orville Wright réalisent devant quelques témoins quatre vols d'une durée comprise entre 12 et 59 secondes en 1903. Après de multiples essais pour maîtriser les virages, ils réalisent en 1905 le premier vol motorisé soutenu de l'histoire, parcourant près de 40kms. Ce succès mit un terme à une longue période de doute. « En 1898, expliqueront les frères Wright, nous étions sur le point d'abandonner nos travaux lorsque le livre de Mouillard (l'empire de l'air) est tombé entre nos mains, et nous avons continué avec le résultat que vous savez... ».

La même année, d'autres français ont pris le relais de Clément Ader. Parmi eux, citons les frères Gabriel et Charles Voisin, originaires de Lyon, qui fabriquent, à Paris, leur premier biplan à moteur en 1905. Lors de son premier vol la même année,

Gabriel Voisin parcourt 150 mètres à 17 mètres de hauteur. En 1906, les frères Voisin fondent la première entreprise de construction d'aéroplanes. Ils construisirent des biplans pour Henri Farman et Léon Delagrangé qui réalisèrent quelques records. En 1808, un appareil Voisin piloté par Farman réalise le premier kilomètre en circuit fermé. L'entreprise Voisin connut une forte expansion, surtout durant la 1^{ère} guerre mondiale avec la construction d'avions de reconnaissance et de bombardiers.

Autre lyonnais d'origine, Ferdinand Ferber constitue lui aussi l'un des pionniers français de l'aviation. Il réalise lui aussi son premier vol motorisé en 1905 avant de devenir ingénieur pour la société française de construction de moteur d'avion «Antoinette » dirigé par Léon Levavasseur.

⇒ *1907 : premier vol d'un hélicoptère par Paul Cornu*

Le premier décollage reconnu d'un hélicoptère avec son pilote a été accompli par le français Paul Cornu en 1907, à Lisieux.

C'est cependant en 1924, avec un retard de 16 ans sur l'avion, que le premier kilomètre en circuit fermé fut effectué par un hélicoptère, lequel fut piloté par Etienne Oehmichen. Et ce n'est qu'en 1936 que le programme complet des vols stationnaires, des translations latérales, du vol de croisière prolongé et, surtout, le premier atterrissage de précision, fut effectué par un hélicoptère, celui de Louis Breguet et René Dorand.

Connaissant une belle carrière militaire, l'hélicoptère demeurera dans une position marginale pour ce qui concerne son utilisation civile, pour laquelle l'avion présente des possibilités bien supérieures.

1869-1891 : Mise au point du moteur électrique et première application aux locomotives et à l'automobile

⇒ *1869-1873 : invention du moteur électrique par Zénobe Gramme et Hippolyte Fontaine*

Quand le Belge Zénobe Gramme commence à s'intéresser à l'électricité, des machines magnéto-électriques existent déjà, utilisées notamment pour l'alimentation des lampes à arc. Mais leur puissance demeure limitée par les aimants. Or, on savait fabriquer des électro-aimants, c'est à dire des pièces de fer autour desquelles on a enroulé un fil métallique. Quand un courant électrique passe dans le fil, le fer devient aimanté ; il était ainsi possible d'obtenir de fortes aimantations. Gramme va alors réussir à remplacer les aimants permanents des générateurs magnéto-électriques par des électro-aimants, obtenant ainsi un générateur dynamo-électrique. Le mouvement de ce dernier est rotatif avec une partie fixe, le stator, de forme cylindrique, à l'intérieur duquel peut tourner le rotor. Des enroulements de fils électriques judicieusement disposés permettent à l'ensemble de produire un courant intense quand le rotor est mis en rotation (grâce à un moteur à vapeur ou un moteur à gaz). Indiscutablement importante, l'invention de Gramme n'aurait pas fait son effet véritablement révolutionnaire s'il n'y avait pas eu la réversibilité. C'est Hippolyte Fontaine qui, en 1873, découvre la réversibilité de la dynamo, inventant ainsi le moteur électrique. Si on fait tourner la dynamo, on obtient un courant électrique. Mais si, au contraire, on connecte les bornes de cette dynamo à une source de courant (des piles ou une autre dynamo), la machine se met à tourner et fournit de l'énergie mécanique.

L'intérêt du moteur électrique est considérable : on peut facilement le faire tourner à différentes vitesses, en fonction de l'alimentation électrique ; des moteurs électriques de grande taille peuvent produire des courants électriques d'une intensité énorme ; il est propre puisqu'il ne dégage pas de fumées, pas de cendres, pas d'importants dégagements de chaleur. Ainsi, à la fin du 19^{ème} siècle, une concurrence très forte se développera entre le moteur à gaz et le moteur électrique pour la motorisation des ateliers ; le second finira par l'emporter. Le travail dans les usines sera bouleversé par l'arrivée de l'électricité. Celle-ci libère de la manutention du charbon, comme des variations du débit des cours d'eau. L'électricité apporta également une plus grande efficacité dans la production en permettant aussi bien la concentration maximale de la puissance que son utilisation morcelée : la multiplication des moteurs électriques accouplés directement à l'outil se traduit par la suppression des courroies conduisant auparavant à la machine à vapeur centrale. Ainsi, l'électricité offre la possibilité de faire fonctionner les machines seulement aux moments où elles sont strictement nécessaires (la commande individuelle prenait le pas sur la commande collective).

En 1878, la société française Gramme, créée par Zénobe Gramme et Hippolyte Fontaine, commence la construction industrielle d'alternateurs, c'est à dire de machines transformant une énergie mécanique, issue par exemple d'une machine à vapeur, en une énergie électrique.

⇒ *1879 : invention de la première locomotive électrique par Werner Siemens et Johann Georg Halske*

En 1879, les allemands Siemens et Halske présentent un petit train tracté par une petite

locomotive électrique lors de l'exposition de Berlin. Malgré ses dimensions modestes, cette locomotive est considérée comme le point de départ de la traction électrique.

⇒ *1881 : mise en service du premier trolleybus électrique par Werner Siemens et Johann Georg Halske*

En 1881, c'est la mise en circulation du premier trolleybus électrique à Berlin, par l'entreprise allemande Siemens und Haske. Il s'agit d'un véhicule sur pneus circulant sur la chaussée normale et alimentée en courant électrique par des fils aériens. Il est appelé trolleybus parce que la prise de courant s'effectuait par l'intermédiaire d'un câble souple relié à un chariot – Trolley en anglais – se déplaçant sur la ligne aérienne tel une tyrolienne. Rencontrant des problèmes de synchronisation entre le chariot et le véhicule, ce premier modèle n'est guère satisfaisant.

Il faudra attendre 1900 pour qu'un nouveau Trolleybus conçu par l'ingénieur Lyonnais Lombard-Gérin, apporte l'innovation du chariot automoteur synchronisé avec le véhicule. Mais cette avancée ne débouche toujours pas sur une exploitation commerciale réussie du trolleybus. Il faut attendre les années 1930 pour que le Trolleybus connaisse un véritable essor, prenant le relais du tramway électrique alors en déclin. Le trolleybus connaît cependant un déclin fatal durant les années 1970, disparaissant de toutes les villes françaises, à l'exception notable de Lyon, Saint-Étienne et Grenoble. La ville de Lyon possède d'ailleurs aujourd'hui, le réseau de Trolleybus le plus étendu de France.

⇒ *1884 : mise en service de la première ligne de chemin de fer à traction électrique*

Le succès de l'électrification urbaine pousse de nombreuses compagnies à essayer de l'appliquer sur les grandes lignes. Inauguré en 1884, le premier chemin de fer électrique fut celui de la chaussée des géants en Irlande.

Si l'électrification des chemins de fer en France a vraiment commencé vers 1900, la première électrification eu lieu en 1893 à Saint-Étienne sur la ligne de Montmartre à la Béraudière. Il s'agissait cependant d'une électrification à vocation industrielle puisque la ligne servait à l'évacuation du charbon. L'électrification d'une grande ligne de transports de passagers n'aura lieu qu'en 1926 sur le tracé Paris-Vierzon.

⇒ *1888 : mise en service du premier tramway électrique par Franck Sprague*

La première ligne de tramway électrique opérationnelle fut construite en 1888 par l'américain Franck Sprague pour une ligne à Richmond (Virginie). C'est à Clermont-Ferrand qu'est mise en service la première ligne de tramway électrique de France en 1890.

⇒ *1891 : invention de la première voiture électrique*

C'est aux Etats-Unis qu'ont été mise au point les premières voitures électriques : en 1891, l'« Electrobat », fabriquée par Morris et Salom en petite série, puis, à partir de 1892, la « Morrison » du nom de son fabricant William Morrison.

Mais c'est en 1899 que la viabilité de la voiture électrique éclate aux yeux du monde entier. En effet, la « Jamais Contente », pilotée par C. Jenatzy, est la première voiture à dépasser 100 km/h. La voiture électrique est alors commercialisée un peu partout. En 1911, on trouve à Paris ainsi qu'à Londres des taxis électriques. Avant la Première Guerre mondiale, un tiers des véhicules

américains roulent à l'électricité. Mais les années 1920 et 1930 marquent clairement le déclin du véhicule électrique. En effet, l'accroissement des distances rend un véhicule doté d'une autonomie de 80 km (tout au plus) inadapté au contexte. De facto, la popularité des véhicules à essence croît. Alors que l'on commence à trouver de nombreuses stations-service, on ne trouve quasiment aucune borne électrique. A l'exception de certaines utilisations particulières, comme les véhicules de livraison, l'énergie électrique ne sert plus. Il faut attendre 1995 pour que sortent enfin les premières voitures électriques produites en série et commercialisées depuis la Seconde Guerre mondiale.

⇒ 1900 : *inauguration du métropolitain de Paris*

C'est la traction électrique qui va permettre l'essor des chemins de fer totalement enterrés. C'est ainsi que la première ligne de métro de Paris est mise en service en 1900.

1900-2000 : l'explosion des mobilités motorisées et la course à la performance technique

Alors que débute le 20^{ème} siècle, les modes de transport qui forment notre système de transport actuel existent déjà : l'automobile construite à partir du moteur à explosion pour servir les mobilités individuelles du quotidien ; les chemins de fer à locomotives électriques pour les transports nationaux ; les transports maritimes pour les échanges intercontinentaux. A ces modes de transports existants, viendra rapidement s'ajouter l'avion pour le transport de passagers à l'échelle internationale. Les principes techniques

fondamentaux étant acquis, le 20^{ème} siècle sera celui de la diffusion de cette offre de transport et de l'amélioration continue de ses performances. Autrement dit, entre la première locomotive à vapeur et le futur TGV, il n'y aurait qu'une différence sur le plan de la performance et non sur le concept de transport lui-même. En ce sens, certains observateurs, tel que J.Baudet (2004) estiment que, en matière de transports, l'entrée dans le 20^{ème} siècle marque surtout l'essor des innovations technologiques au détriment des innovations techniques : la technique évolue par inventions souvent « révolutionnaires » (le feu, le fer, la machine à vapeur...); la technologie est une exploitation rationnelle, systématique et animée par la recherche du profit des possibilités techniques. Toutefois, parce qu'il ne sera pas le même pour chaque mode de transport, le processus de diffusion et d'optimisation évoqué aura des conséquences sur le contexte même sur le système de transport.

Reflet et instrument de l'individualisation des trajectoires de vie, l'automobile connaîtra un essor particulièrement important avec l'industrialisation de sa production. L'expansion de l'industrie automobile engendrera d'ailleurs un puissant effet d'entraînement sur l'ensemble des économies nationales, l'automobile n'ayant pas d'égal dans toute l'histoire économique sur le plan de la diversité et du volume de la consommation de matières premières¹. Cet essor induira également un renforcement des politiques d'aménagement des réseaux dédiés à ce mode de transport. Il posera aussi la question de la dépendance énergétique du

¹ C'est ainsi à la production automobile que l'on doit pour l'essentiel l'impressionnante croissance économique américaine des trois premières décennies du 20^{ème} siècle, croissance qui n'a atteint l'Europe et l'Asie qu'après la seconde guerre mondiale.

pays par rapport à l'étranger pour ce qui concerne l'approvisionnement en pétrole. Il interroge enfin l'impact sur l'environnement de l'automobile. La prise en compte des conséquences du développement du transport automobile conduit finalement par une inflexion technique sur le plan de la motorisation et des carburants.

1900-1970 : de l'industrialisation de la production automobile à la démocratisation de son usage

Au début du 20^{ème} siècle, l'industrialisation ne concerne encore que certains secteurs de l'économie (production agricole, transformation des métaux, textile, transports par chemins de fer). C'est maintenant au tour de la production automobile d'appliquer les principes industriels. Ces derniers feront ici l'objet d'un réel approfondissement sur le plan organisationnel avec la division du travail selon la chronologie du processus de production mise en place pour la première fois par Henri Ford.

L'industrialisation de la construction automobile va permettre la démocratisation de son usage. Le nombre de véhicule en circulation ne va cesser d'augmenter durant tout le 20^{ème} siècle. En France, le parc de véhicules particuliers passe de 300 unités en 1895 à plus de 2 millions en 1938. Il atteint aujourd'hui 30 millions d'unités.

⇒ *1908 : fabrication de la première automobile industrielle par Henri Ford*

Après avoir fabriqué quelques voitures de courses, l'ingénieur Henri Ford décide de se lancer dans l'étude puis la production d'une voiture destinée au grand public. L'objectif est de parvenir à mettre sur le marché une automobile à coût réduit pour en faire un produit de grande consommation. Pour

baisser les coûts de production, il va rechercher une autre piste d'amélioration de la productivité que celle principalement appliquée jusqu'ici par la pensée industrielle, l'économie d'énergie et de matières premières. Appliquant le principe de standardisation à l'automobile, il va repenser l'organisation du travail en tant que telle. Il préconise ainsi une division du travail approfondie et une organisation des tâches le long d'une chaîne de production. C'est ainsi qu'Henri Ford invente le concept de l'adéquation entre production de masse et consommation de masse. Le premier résultat de sa démarche productive sera la célèbre Ford T présentée en 1908.

C'est le début de la diffusion de l'automobile dans les pays industrialisés. Alors qu'entre 1908 et 1916 la production de Ford passe de 6400 à 500 000 unités, le nombre de voitures en circulation est multiplié par trente aux Etats-Unis entre 1910 et 1940. En 1930, ces derniers consomment déjà les 3/4 de la production mondiale de pétrole.

⇒ *1905-1949 : essor et spécialisation de l'entreprise Berliet*

En France, l'entreprise lyonnaise Berliet sera l'une des premières à inscrire son développement dans cette logique « industrialisante ». L'année 1904 voit les premières participations des voitures Berliet en compétition. Elles glaneront, en 1905, plus de 25 premiers prix auxquels s'ajoutent différents prix d'élégance pour leurs qualités et leur esthétisme. A l'étranger, on commence à s'intéresser à la production Berliet. Ainsi, toujours en 1905, la société américaine de fabrication de locomotives à vapeur « American Locomotive Company » (ALCO) de Broadway décide d'ajouter une branche automobile à son activité. Ayant essayé les meilleurs châssis français, allemands et anglais,

l'ALCO constate que ce sont les véhicules Berliet qui présentent les meilleures qualités d'endurance, de robustesse et de simplicité. Elle propose alors 500 000 francs or à Marius Berliet d'acquiescer une licence pour fabriquer et commercialiser ses voitures outre-Atlantique. Cet apport financier permet à Marius Berliet d'opérer une inflexion dans sa stratégie de développement vers des modes de production véritablement industriels. Berliet investit progressivement dans l'extension de son usine de Montplaisir – dont la surface passe progressivement de 5 000 à 48 000 m² – l'achat de machines-outils haut de gamme et l'embauche de personnel, lequel passe de 250 à 4 000 ouvriers entre 1905 et 1913. En cohérence avec cette orientation, en 1909 Berliet décide de se retirer du sport automobile, considérant que celui-ci constitue de moins en moins un vecteur pertinent pour promouvoir l'image qu'il souhaite donner de sa marque, à savoir une voiture de tourisme de qualité¹.

Parce qu'il s'acharne à perfectionner sans cesse la qualité et les performances de ses modèles, Berliet voit sa notoriété s'affirmer d'année en année. Il s'engage dans une course à la puissance avec au catalogue des 16 puis 22, 40, 60 et même 80 ch, mais sans jamais perdre de vue l'esthétisme et la sobriété en matière de consommation. Ce dernier point constitue aux yeux de Berliet une question essentielle pour l'avenir de l'automobile. Les performances remarquables des Berliet en la matière alimenteront d'ailleurs nombre de controverses tant elles se révèlent remarquables : en 1906, sur les 100 kms de la route Arles-Sablon, une voiture Berliet ne consommera que 9 litres où

¹ Berliet utilisa sa décision dans un slogan publicitaire : « Berliet ne court pas et gagne tout de même. Une renommée solide acquise dans le monde entier, sans bruit et sans bluff, par l'excellence seule de sa construction, voilà pour Berliet le plus beau Grand prix ».

n'importe quelle autres voitures en consommerait 18. Autre ingrédient de son succès, à partir de 1905, Berliet est le premier constructeur français à vendre des voitures entièrement terminées ; jusqu'ici le châssis, la mécanique et le moteur étaient fabriqués dans l'usine de Montplaisir, l'ensemble était remis entre les mains d'un carrossier et c'est chez ce dernier que l'acheteur prenait possession du véhicule. Cette volonté de maîtrise intégrale du processus de production s'inscrit dans le projet de production totalement industrielle que bâtit pas à pas Berliet. L'industriel qui l'impressionne le plus est en effet Henry Ford avec lequel il partage l'ambition de démocratiser l'automobile grâce à la fabrication en série. Au moment où Ford sort sa Ford T, Berliet lance la production en série du modèle Torpédo.

Un nouveau virage se profile en 1906 et 1907 lorsque, face à un certain ralentissement du marché de la voiture de tourisme², Marius Berliet entrevoit une autre perspective de développement avec les véhicules poids-lourds : camion et autocar. Il est en effet parmi les premiers à percevoir l'intérêt du transport routier automobile comme prolongement et même concurrent du chemin de fer pour le transport de marchandises et de personnes. En 1906, Berliet sort son premier camion, un 2 tonnes d'aspect très rudimentaire, suivi l'année suivante par un premier autocar. Dès 1906, le premier camion Berliet remporte le concours militaire de poids lourds organisé sur l'itinéraire Paris-Marseille-Paris : sur les 21 camions présents au départ, il obtient le maximum de points. Berliet sera bientôt le premier constructeur au monde à proposer une gamme complète de véhicules industriels dotée de

² On assiste à l'époque à une surproduction de grosses voitures dont les modèles ne trouvent acheteurs qu'auprès d'une certaine clientèle, peu à peu saturée.

châssis spécifiques renforcés, de gros moteurs à régime lent et d'organes robustes. Le premier autocar Berliet donne quant à lui naissance aux premiers voyages touristiques, entre Grenoble et le Lautaret. Ainsi, s'il produit plus de 1200 voitures annuellement à cette époque, dont le dernier modèle 6 cylindres dépasse les 100 km/h, Marius Berliet intensifie la fabrication de camions et d'autocar pour se positionner comme le spécialiste du « poids lourd » : entre 1908 et 1914, le parc de poids lourds circulant en France passe 600 à 7 000 unités. De fait, à un moment où certains constructeurs commencent à connaître des difficultés de débouché, Berliet voit son développement s'accélérer grâce à la diversification de sa production. Au début des années 1910, ses usines sont désormais les plus importantes de la région lyonnaise et Berliet prépare déjà la prochaine étape de son développement en créant la société Tribble (anagramme de Berliet) chargée de prendre des options, parcelles après parcelles, sur 212 hectares de terres situées à Vénissieux le long de la ligne de chemin de fer Lyon-Grenoble. Ainsi, à la veille de la Première Guerre mondiale, Lyon a consolidé sa place de second pôle automobile en France, derrière la région parisienne, et plus largement comme centre automobile majeur en Europe.

C'est alors que survient le premier conflit mondial. La France a besoin d'obus, de camions et de chars. L'entreprise Berliet jouera un rôle considérable durant cette période. Elle transforme notamment ses machines pour tourner des tourelles de char au lieu de roues de voiture. Mais ce sont surtout ses camions qui s'illustreront durant la guerre. Dès 1906, l'armée française avait été séduite par les performances des camions Berliet. Dès lors, elle

sollicitera Berliet pour la construction des camions, les fameux type 22 CBA, nécessaires à l'acheminement des hommes et du matériel vers les lieux de combat. En 1916, alors que les usines Berliet fabriquent jusqu'à 40 CBA par jour, c'est l'épisode célèbre de la « Voie Sacrée » entre Bar-le-Duc à Verdun, sur laquelle un trafic ininterrompu de 3 500 camions, dont la plupart sont des Berliet, effectuera le transport de 90 000 hommes et 50 000 tonnes de matériel par semaine vers le front. 1916 est aussi le moment pour Berliet de réaliser les options prises sur les terrains de Vénissieux et commencer la construction de l'usine qui lui permettra d'assouvir sa vision industrielle. Gigantesque – elle est 1/3 plus vaste que les usines Ford de Détroit de l'époque – et ultramoderne – elle est la première en Europe à être organisée sur le principe de la chaîne en continue entre les différentes tâches – l'usine de Vénissieux sera complètement opérationnelle en 1918.

La signature de l'armistice va mettre en difficulté les entreprises françaises de construction de poids lourds au premier rang desquelles figure Berliet. En effet, pendant la guerre, près de 38 000 camions ont été construits. La plus grande partie se trouve sans emploi à la fin du conflit et sont donc mis sur le marché à des prix défiant toute concurrence. Si Berliet est effectivement devenu le premier fabricant de poids lourds au monde, celui-ci va connaître de grandes difficultés financières au début des années 1920, difficultés qui ne seront résorbées qu'à la fin de la décennie. Cette dernière est le moment où le génie industriel de Berliet recouvre tout son éclat. Alors que l'onde de choc de la crise de 1929 se montre implacable avec tous les secteurs de l'économie, Berliet réalise un coup de maître en faisant le choix d'équiper ses camions de moteurs

diesel¹, après en avoir acheté la licence à la firme allemande Bosch en 1930 ; une autre licence pour l'exploitation d'un moteur diesel sera acquise en 1935. Il sera bientôt le seul constructeur français à présenter une gamme complète de poids lourds équipés de moteur diesel. Parce que les moteurs diesel consomment avec une grande sobriété un carburant nettement moins cher que l'essence, Berliet permet ainsi aux transporteurs routiers d'effectuer des économies d'exploitation tout à fait bienvenues à l'époque. Au début des années 1930, alors qu'il assoit davantage son statut de leader sur le marché des poids lourds, Berliet se rend également à l'évidence que tout ses efforts pour tenir sa place sur le marché des voitures de tourisme sont vains : la concurrence que constituent Citroën, Renault et Peugeot est de plus en plus impitoyable. Il décide alors de se retirer peu à peu de ce marché pour se consacrer exclusivement à celui du poids lourds. La gamme Dauphine de 9 et 11ch constituera ainsi ses derniers succès en matière de voiture de tourisme, les Dauphine se distinguant par des roues avant indépendantes et une direction à crémaillère. La seconde guerre mondiale sera la période pendant laquelle Berliet stoppe définitivement la production de voiture de tourisme.

⇒ 1949-2000 : de la légende des camions

Berliet à la formation du groupe Renault Trucks

Après le décès de Marius Berliet en 1949, c'est l'un de ses fils Paul qui prend les rênes de l'entreprise en 1950. De plus en plus tournée vers l'étranger la production va s'accroître : de 17 camions par jour en 1950, elle passera à plus de 120 camions par jour en 1974. Les événements marquant du

développement de la société Berliet durant les trente glorieuses sont les suivants : 1949, lancement d'un nouveau camion à cabine tout acier et à moteur diesel 5 cylindre, le fameux GLR construit jusqu'en 1977 et élu camion du siècle en 1994 par un jury de journalistes professionnels européens (100 000 exemplaires seront produits à Vénissieux, sans compter ceux produits à l'étranger) ; 1957, lancement du premier camion français équipé d'un moteur diesel à turbocompresseur ; 1957, lancement du plus gros camion du monde, le T100 ; 1958, lancement du camion GAK équipé de la cabine avancée "Relax" en acier embouti, pourvue d'un pare-brise panoramique en une seule partie garantissant un confort maximum et une visibilité jamais égalée jusqu'alors ; 1962, mise en place du centre d'études et de recherche, premier du genre en France pour les constructeurs de poids lourds ; 1965, lancement du « Stradair », camion à suspension pneumatique « Airlam » révolutionnaire pour l'époque puisque offrant au poids lourd le même agrément de conduite et de confort qu'une voiture particulière (au fil des ans, la suspension pneumatique a été adoptée en Europe par tous les constructeurs de tracteurs routiers et de semi-remorques, puis par le TGV) ; 1967, association avec le groupe Michelin sur le principe de l'échange de 80% du capital de Berliet par les héritiers de Marius Berliet contre 20% du capital de Citroën (qui appartenait alors à Michelin), association qui aboutit au transfert de la fabrication des camions Citroën chez Berliet ; 1970, lancement de la cabine basculante KB2400 qui s'impose rapidement comme la référence en Europe pour le confort et la sécurité (isolation phonique et thermique) ; 1972, alors que progressivement les camions porteurs sont

¹ Inventés en 1893, les moteurs diesel étaient jusqu'ici trop lourds pour être adaptés à l'automobile

remplacés par les tracteurs routiers pourvus de semi-remorques, Berliet lance son tracteur TR280 pourvu d'un moteur dont le couple dépasse de 30 à 50% le couple au régime de rotation classique maximum ; 1974, parce que Citroën connaît de graves problèmes financiers, le groupe Michelin cède Berliet à la Régie Renault en contrepartie de l'aide des pouvoirs publics, tandis que Citroën est regroupé avec Peugeot ; 1978, fusion des constructeurs Berliet et Saviem (branche poids lourds de la régie Renault) pour créer Renault véhicules industriels (RVI) qui devient le seul constructeur français de poids lourd (le siège de RVI est transféré à Lyon) ; 1990, lancement du tracteur routier AE, succès immédiat grâce à ces nombreuses avancées technologiques (freins à disques à l'avant, cabine surélevée, position avancée de l'essieu avant) pour un poids lourds élu camion de l'année en 1991 ; 1990, RVI prend le contrôle de la totalité du capital du constructeur américain de poids lourds Mack ; 2001, RVI devient une société du groupe Volvo et adopte en 2002 l'appellation Renault Trucks ; 2005, lancement du nouveau tracteur routier Premium muni d'un châssis modulaire permettant un très grand nombre de configuration, d'une boîte de vitesses libérant le conducteur des contraintes liées aux passage de vitesse, de freins ERS et d'un système ESP de contrôle de trajectoire.

⇒ *1934 : invention de la traction avant par André Lefebvre*

L'invention du joint homocinétique par les ingénieurs français Pierre Fenaille et Jean Grégoire en 1926 rendit concevable la traction (avant) des automobiles qui jusqu'ici étaient propulsées (arrière). Ce joint permettait en effet d'éviter les à

coups dans la transmission lors du braquage des roues.

Mais le véritable père de la traction avant est l'ingénieur français André Lefebvre. Engagé le 1^{er} mars 1933 par André Citroën, il réussit l'exploit de mettre au point et de construire en un an la première voiture à traction avant. La Traction remporta un véritable triomphe au salon de l'automobile de 1934 et restera en production jusqu'en 1957. Le procédé présentait de tels avantages (poids, transmission...) qu'actuellement presque toutes les voitures sont des « tractions ».

Depuis 1970 : l'amélioration du comportement écologique de l'automobile

Le contexte de crise pétrolière et plus récemment de prise en compte des enjeux de pollution de l'atmosphère a stimulé la mise au point de carburants alternatifs à ceux issus du pétrole, essence et gazole principalement. Ces travaux de recherche portent d'une part sur la (re)découverte de processus de transformation de la biomasse en carburants (biocarburants). Il faut en effet rappeler que, à la fin du 19^{ème} siècle, déjà, on expérimentait l'alcool de betterave sur les premiers moteurs à combustion interne. Après un apogée peu après 1930, les biocarburants furent supplantés par les produits pétroliers. Les recherches en matière de carburants alternatifs visent également la mise au point de nouveaux procédés de valorisation des énergies fossiles conventionnelles (pétrole et gaz) pour la production de carburants moins polluants.

⇒ *Antiquité : découverte de l'éthanol*

L'éthanol est le nom savant de l'alcool éthylique ou plus simplement de l'alcool que l'on trouve dans toutes les boissons dites alcoolisées. Le procédé pour l'obtenir – distillation et fermentation du sucre

des betteraves ou de l'amidon des pommes de terre et des céréales – remonte à l'antiquité. Dans le cadre du système automobile actuel, il peut être mélangé à l'essence dans des proportions allant de 5 à 85%. Au-delà de 20% l'adaptation des moteurs de voitures est souvent nécessaire.

L'éthanol présente un intérêt environnemental certain. Le remplacement d'une tonne d'essence par une tonne d'éthanol réduit de 75% les émissions de gaz à effet de serre. En effet, on considère que les émissions de CO₂ lors de la combustion de l'éthanol sont annulées par le fait que le CO₂ en question a été préalablement absorbé par la plante qui a servi à produire ce biocarburant : le bilan atmosphérique ne serait donc pas modifié. Cette compensation n'est cependant pas égale à 100% dans la mesure où la culture des végétaux nécessaires à cette production implique l'utilisation de combustible fossile classique pour les tracteurs, lors de la transformation en carburant...

La crise pétrolière des années 1970 et 1980 qui va cependant relancer l'intérêt de sa production. C'est le Brésil qui va s'engager le premier et de façon massive dans cet effort de production, suivi par les Etats-Unis. Ces deux pays demeurent encore aujourd'hui les principaux producteurs et consommateurs d'éthanol à des fins de carburant.

⇒ 1661 : découverte du méthanol

Le méthanol, ou alcool méthylique, a été découvert par le chimiste irlandais Robert Boyle en 1661, dans les produits de distillation du bois. Mais ce sont deux français, Jean-Baptiste Dumas et Eugène Péligot, qui en établirent la constitution en 1835.

⇒ 1987 : début des recherches sur le diester

Le Biodiesel ou diester est obtenu à partir d'huile végétale (colza, soja...) mélangée à de l'éthanol

pour en réduire la viscosité. Il présente le même intérêt environnemental que le bioéthanol en matière d'émissions de CO₂. Destiné à entrer dans la composition du gazole traditionnel à hauteur de 5%, le diester a été mis au point par l'Institut Français du Pétrole – dont la principale antenne de recherche est installée en région lyonnaise (Solaize) depuis 1967 – dans le cadre d'un partenariat avec la fédération des oléagineux et des protéagineux. Près de dix ans de recherches seront nécessaires pour parvenir à la mise au point.

Aujourd'hui, les plus gros producteurs de biodiesel sont les États-Unis, l'Allemagne et la France.

⇒ 1930 : première exploitation du Gaz Naturel pour Véhicule (GNV)

Le gaz naturel pour véhicules, constitué à 97% de méthane, est du gaz naturel conditionné pour être utilisé dans les moteurs des véhicules. Il fait partie des carburants fossiles les moins polluants : par rapport au gazole, le GPL rejette 50% de moins d'oxyde d'azote et aucune particule. Cependant, parce qu'il présente des performances mécaniques inférieures, le GNV entraîne une légère surconsommation par rapport au gazole, laquelle réduit son intérêt sur le plan des émissions de CO₂. L'Italie a été le premier pays à utiliser de façon significative le GNV dans les années 1930, notamment en raison de la disponibilité de ressources en gaz naturel dans ce pays, et représente aujourd'hui le marché le plus important d'Europe, avec plus de 380 000 véhicules. Toutefois, plus de la moitié du parc GNV mondial se situe actuellement sur le continent américain, et notamment en Argentine et au Brésil.

⇒ 1970 : diffusion du Gaz de Pétrole Liquéfié (GPL)

Le Gaz de Pétrole Liquéfié (GPL) est constitué d'un mélange de butane et de propane issu du raffinage du pétrole et du traitement du gaz naturel. Il présente des caractéristiques environnementales équivalentes au GNV. Toutefois, son utilisation entraîne, comme pour le GNV mais de façon plus marquée, des surconsommations qui réduisent son intérêt environnemental.

Dans les années 1970 et 1980, le GPL a été très en vogue aux Pays-Bas, en Belgique et en Italie, jusqu'à ce que l'on découvre la supériorité du gaz naturel. Encore aujourd'hui, le GPL représente près de 60 % du parc « essence » en Hollande, plus de 30 % en Italie, de 40 à 60 % aux États-Unis et au Canada.

⇒ 1996 : mise au point de l'aquazole

Issu de recherches conduites par ELF durant les années 1990, l'Aquazole se présente sous la forme d'une émulsion d'eau dans du gazole (diesel). Il présente l'intérêt de diminuer considérablement les émissions d'oxyde d'azote, de particules et de fumées noires. Il s'avère donc particulièrement intéressant pour les poids lourds et les bus. Toutefois, selon une étude de l'Ademe sur des bus présentée en 2002, l'utilisation de l'Aquazole entraîne une augmentation d'environ 10% de la consommation par rapport au gazole. Comme l'Aquazole contient 13% d'eau, il n'y a pratiquement pas de gain en terme d'énergie.

1910-2000 : la mise en place d'une filière de production aéronautique et d'une offre commerciale dédiée

La guerre 14-18 a été le cadre d'une première sollicitation de l'aviation encore en pleine mise au point. Alors qu'avant 1914, il n'y avait dans le monde que quelques petites entreprises fabriquant

de temps en temps une machine, la guerre se traduit par la mise en place de vastes usines appliquant les méthodes de production industrielle afin de produire des avions de chasse ou de bombardement en grand nombre.

Mais, au sortir de la guerre, le débouché militaire n'existant plus, il fallait trouver une autre destination aux avions. La première sera le transport du courrier, mais celui-ci se révélera presque dérisoire par rapport aux potentialités de la machine volante. C'est le transport aérien de passagers et de marchandises qui est alors envisagé.

⇒ 1919 : création de l'aéropostale par Pierre-Georges Latécoère

Développée au lendemain de la Première Guerre mondiale alors que de nombreux pilotes et avions se retrouvent sans activité, l'aviation commerciale (tout d'abord postale) doit beaucoup au courage de ses premiers pilotes, véritables pionniers de l'aviation. Après les premières « traversées » - Louis Blériot et la Manche en 1909, Roland Garros et la Méditerranée en 1913, Charles Lindberg et l'Atlantique Nord en 1927... - chaque vol demeure une aventure risquée, qui peut être fatale. Le quotidien et les exploits de ces pilotes nous sont rapportés par l'écrivain lyonnais Antoine de Saint-Exupéry - lui-même pilote de l'aéropostale - dans son célèbre roman « Vol de nuit » (qui décrit un vol postal en Amérique du Sud), ainsi que dans d'autres œuvres.

⇒ 1933 : le Boeing 247, premier avion de ligne à être mis en service dans le monde

Le Boeing 247 entra en service pour l'United Airlines en 1933. Il transportait 10 passagers et réduisait la durée de la traversée des États-Unis à moins de 20 heures. Ce monoplan bimoteur à aile basse présentait des nouveautés qui allaient

révolutionner le transport aérien : train d'atterrissage escamotable, dégivrage des ailes, hélices métalliques à pas variables...

⇒ 1933 : création de la compagnie aérienne *Air France*

Air France a été fondée le 7 Octobre 1933 par la fusion des cinq compagnies principales du transport aérien français: Aéropostale, Air Orient, Air Union, C.I.D.N.A. et S.G.T.A., sous forme d'une société anonyme au capital de 120 millions de francs dans laquelle l'État détenait au moins 25% des actions. Au lendemain de la Seconde Guerre mondiale, l'Aviation civile française fut nationalisée et Air France devient alors propriété de l'État. En 1999, Air France fait l'objet d'une privatisation partielle.

En Europe, la création par la France d'une compagnie nationale de transports aériens intervient après celles de KLM aux Pays-Bas en 1919, de la Lufthansa en Allemagne en 1926...

⇒ 1930-1940 : invention du moteur à réaction

Le principe de fonctionnement du moteur à réaction repose essentiellement sur la projection d'un gaz produisant une poussée dans la direction opposée. Dans le cas le plus courant, le gaz expulsé est le résultat d'une réaction chimique contrôlée qui permet de produire un gaz à haute température qui, en se détendant, acquiert une grande vitesse (plus la vitesse est importante plus la poussée est forte). Parmi les différents types de moteurs à réaction, le plus courant est le turboréacteur. Son principe a été inventé simultanément par Sir Frank Whittle en Angleterre et par le Dr. Hans von Ohain en Allemagne dans les années 1930. Le premier turboréacteur fut construit par Whittle en 1935 et tourna au banc en 1936. Mais ce fut von Ohain qui fit voler le premier turboréacteur sur un Heinkel He 178 en 1939. Après guerre, les turboréacteurs et

turbopropulseurs se généralisèrent, aussi bien dans l'aviation militaire que civile.

⇒ 1952 : le *Comet I*, premier avion de ligne à réaction à être mis en service au monde

Premier avion civil à réaction, construit par la firme britannique De Havilland Aircraft Compagny, fut mis en service en 1952. La mise en service de ce type d'avion sonne le déclin progressif de l'hélice au profit du réacteur.

⇒ 1958 : mise en service de la *Caravelle* construit par la Société nationale des constructions aéronautiques du Sud-Est

Après la Seconde Guerre mondiale, toutes les grandes entreprises aéronautiques françaises envisagent de lancer la construction d'un avion de transport civil. La Caravelle sera la première concrétisation de ce projet commandité par Air France. Construite par la Société nationale des constructions aéronautiques du Sud-Est, la Caravelle est mise en service en 1958 par Air France.

De conception révolutionnaire et pouvant transporter 130 passagers, c'était le premier avion de ligne court-courrier à réaction du monde. La disposition de ses réacteurs à l'arrière de l'appareil, de chaque côté du fuselage, rendait les ailes absolument libre, comme celle d'un planeur, augmentait la stabilité et réduisait le bruit dans la cabine.

⇒ 1970 : le *Boeing 747*, premier avion de ligne à grande capacité à être mis en service au monde

Entré en service en 1970 pour Pam Am, le Boeing 747 incarne alors l'entrée dans une nouvelle génération d'avions à grande vitesse appelés « Jumbo-jets ».

Avec la mise en service du 747, Boeing confirme une nouvelle fois la force de sa stratégie de développement, qui sera repris plus tard par Airbus. Depuis les années 1960, les dirigeants de la firme de Seattle, soucieux de s'assurer la fidélité des compagnies aériennes, se préoccupent d'étudier leurs besoins futurs à mesure que se développent les réseaux nationaux et internationaux. Boeing eut alors une véritable vision prospective : il proposa des appareils conçus pour des missions précises – court, moyen ou long courrier – et déclinés selon différentes capacités de voyageurs. Possédant en commun des éléments du fuselage, des équipements ou la motorisation, ces appareils bénéficiaient de coûts de production et d'exploitation réduits. C'est cette stratégie qui guida la conception des différents modèles : 707 en 1954, 727 en 1964, 737 en 1968, 747 en 1970, 757 en 1982...

⇒ 1970 : création du consortium Airbus par association de différents constructeurs européens

Créé en 1970, le consortium de constructeurs aéronautiques européens Airbus comprend aujourd'hui Aérospatiale (France), MMB (Allemagne), CASA (Espagne), British Aerospace (Angleterre), Belairbus (Belgique). La stratégie de développement d'Airbus s'inspirera de celle à l'origine de la réussite commerciale de Boeing.

⇒ 1972 : mise en service du premier avion de ligne Airbus

L'Airbus 300 est mis en service en 1972. C'est le premier Airbus et le premier jumbo-jet moyen-courrier à voler. Les ventes ne démarrent véritablement qu'à la fin des années 1970 pour se maintenir ensuite à un bon niveau. Cet avion atteint

aujourd'hui sa fin de vie commerciale et n'est pratiquement plus vendu qu'en modèle avion-cargo.

⇒ 1976 : mise en service du Concorde par un consortium franco-britannique

Construit par l'association de l'Aérospatiale et de British Aerospace, le Concorde est le premier avion supersonique civil à être mis en service, en 1976. Il sera l'avion de ligne le plus rapide de tous les temps. Pouvant transporter de 100 à 139 passagers, il atteignait une vitesse de mach 2,04.

En 2003, British Airways et Air France ont simultanément annoncé le retrait de leurs Concorde pour l'année suivante. Les raisons invoquées étaient la baisse du nombre de passagers depuis l'accident de Gonesse le 25 juillet 2000 et le coût élevé de maintenance.

⇒ 1987 : l'A320, premier avion civil totalement informatisé à voler au monde

Avion commercial moyen-courrier, l'Airbus A320 est un des avions de transport de passagers les plus vendus au monde aujourd'hui (le plus vendu étant le Boeing 737) : plus de 2 800 appareils ont été livrés (à l'été 2006). L'un des motifs de son succès réside dans le fait qu'il fut également le premier avion de ligne à utiliser les commandes de vol électrique.

⇒ 1991 : l'A340, l'avion civil au plus grand rayon d'action au monde effectue son premier vol

L'Airbus A340 est un avion de ligne quadrimoteur long courrier de grande capacité. L'A340 a détenu le record du monde de distance franchie avec plus de 19 000 km entre l'aéroport du Bourget en France et l'aéroport international d'Auckland en Nouvelle-Zélande, jusqu'en 1994.

⇒ 2005 : l'A380, le plus grand avion de ligne de l'histoire effectue son premier vol

L'Airbus A380 est un avion civil quadriréacteur long-courrier construit par Airbus. Il s'agit du plus gros avion civil jamais conçu de l'histoire de l'aviation, pouvant transporter de 555 à 845 passagers ou jusqu'à 150 tonnes de fret selon la version choisie. Le projet a été lancé en 1993 et fut baptisé Airbus A3XX. Le premier exemplaire a décollé le 27 avril 2005 et le programme A380 est actuellement (octobre 2006) en phase de certification.

1900-2000 : les transports ferrés et métropolitains entre rationalisation et innovation

Avec la montée en puissance de l'automobilité durant la première moitié du 20^{ème} siècle, le chemin de fer est conduit à engager ses premières mutations pour assurer son avenir.

⇒ *1920-1960 : le diesel et l'électricité remplacent la vapeur dans le secteur des chemins de fer*

L'application de la vapeur aux transports ferrés va atteindre ses limites durant les premières décennies du 20^{ème} siècle. La machine à vapeur reste modeste, implique un entretien difficile, fait dépendre la locomotive de son approvisionnement en eau et en charbon, se dernier devenant de plus en plus onéreux en comparaison de l'électricité et du gazole. Cependant, jusqu'aux années 1950, la locomotive à vapeur va connaître une amélioration constante de son rendement grâce notamment aux travaux de l'ingénieur André Chapelon, natif de Saint-Paul-en-Cornillon, localité proche de Firminy dans la Loire. Après une formation d'ingénieur à l'école centrale des arts et manufactures, qu'il intègre en 1914, André Chapelon est embauché par la compagnie du Paris-Lyon-Méditerranée (PLM). Mais c'est au sein du réseau Paris-Orléans (PO),

qu'il intègre en 1925, que Chapelon commence véritablement sa carrière d'« optimisateur » des performances de la locomotive à vapeur. Le PO n'avait pas les moyens d'acheter des locomotives neuves et ses machines rapides existantes, les Pacific 3500 et 4500, étaient de rendement médiocre. En quatre années, Chapelon va réussir l'exploit de multiplier par deux la puissance de la 3566, la plus mauvaise de la série, tout en divisant sa consommation par le même facteur. Appliquant de façon pragmatique les lois de la thermodynamique et de la mécanique des fluides, il déclencha une véritable révolution dans le milieu de la locomotive à vapeur. Alors que la 3566 donne naissance à de nombreux autres modèles, Chapelon acquiert une réputation mondiale.

Le moteur électrique, déjà largement utilisé dans les transports ferrés urbains (métropolitains, tramways), et le moteur diesel ouvrent une alternative pour moderniser les réseaux ferrés. Alors que des locomotives électriques circulent sur quelques lignes du réseau français dès les dernières années du 19^{ème} siècle, il faut attendre 1912 pour que soit mise au point la première locomotive diesel par la société suisse Sulzer. Bientôt locomotives électriques et locomotives diesel vont se partager le réseau français : en raison de son coût élevé, l'électrification concerne d'abord les lignes locales ; les locomotives diesel sont ainsi utilisées sur les lignes à fort kilométrage et pour les manœuvres.

Toutefois, l'électrification est particulièrement lente en France puisque, au sortir de la seconde guerre mondiale, la SNCF n'assure que 21% de son trafic en traction électrique. C'est donc durant les trente glorieuses que va s'accélérer l'électrification du réseau français de chemin de fer ; le tronçon Paris-Lyon du PLM est électrifié entre 1950 et 1952. Ainsi

c'est d'abord l'essor de la traction diesel qui conduit à la disparition définitive de la traction vapeur au début des années 1970. La traction diesel connaît un âge d'or jusqu'au choc pétrolier de 1973. Au milieu des années 1960, elle semble être la traction de l'avenir, et beaucoup pensent que les grandes électrifications ne seront plus prolongées.

⇒ *Depuis les années 1960 : mise au point de trains à grande vitesse*

Dès les années 1950, les ingénieurs savaient qu'en augmentant la puissance des trains classiques, on pouvait atteindre des vitesses élevées. Face à l'essor de l'automobilité, l'augmentation de la vitesse des trains allait finalement constituer la condition sine qua non de la survie des chemins de fer, c'est à dire du maintien d'un avantage spécifique.

L'aérotrain est l'ancêtre des trains à grande vitesse même si sa conception était différente. Mis au point par les ingénieurs français Jean Bertin et Paul Guienne, l'originalité de l'aérotrain était d'utiliser une locomotive équipée d'une motorisation issue de l'aéronautique sur des réseaux permettant sa circulation sur coussins d'air. Expérimenté entre 1962 et 1977, l'aérotrain a longtemps détenu le record mondial de vitesse sur voie terrestre avec des passagers à bord : 425 km/h. Mais, basée sur la consommation d'hydrocarbure, sa motorisation se révélait doublement contraignante : renforçant la dépendance énergétique de la France vis à vis du pétrole ; transférant les fortes consommations d'énergie caractéristiques de l'aéronautique aux transport terrestre. Le principe de l'aérotrain fut ainsi abandonné au profit du projet TGV.

Le TGV n'est pas le premier train à grande vitesse à être exploité de façon commerciale. En effet, dès 1964, la Japanese National Railways inaugure une

ligne à grande vitesse entre Tokyo et Osaka. De conception japonaise, la première génération de trains circulant sur cette ligne pouvait atteindre la vitesse maximale de 270 km/h. D'autres générations de Shinkansen permettront d'élever cette vitesse.

Si le « modèle japonais » séduit les dirigeants des réseaux ferrés du monde entier, c'est en France que l'on passe le plus rapidement aux actes. Désireuse de s'assurer un avenir, la SNCF crée un Service de la recherche qui, à partir de 1966, étudie l'idée d'un réseau de trains à grande vitesse (TGV). Toutefois, la SNCF fait déjà rouler des trains à 200 km/h, vitesse approchant des 210 km/h japonais. Elle pense alors que des vitesses nettement supérieures devront être pratiquées pour bien différencier la grande vitesse de celle du réseau classique : le 300 km/h est ainsi envisagé dès le départ. La première ligne réservée au nouveau train – Lyon-Paris – est mise en chantier en 1978. Terminée en 1983, elle est cependant partiellement mise en service dès 1981. A partir de 1983, Lyon n'est plus qu'à deux heures de Paris. Le TGV obtint plusieurs record du monde de vitesse dont le dernier tient toujours : sur la LGV Atlantique, une rame a atteint 515,3 km/h le 18 mai 1990.

⇒ *A partir de 1980 : Mise en service des premières ligne métropolitaines automatiques au monde*

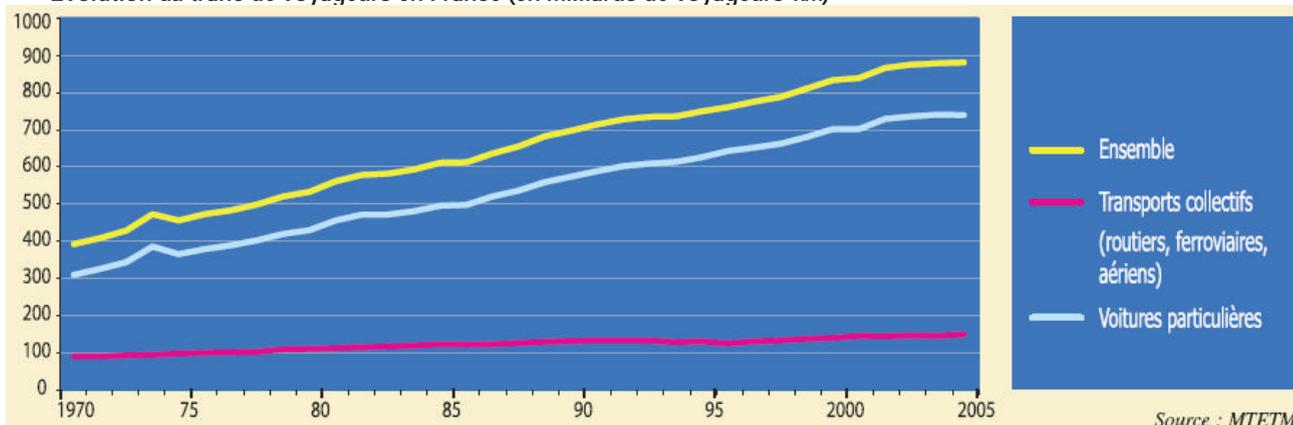
S'appuyant sur le double constat que les entreprises de transport public comme la RATP sont fortement déficitaires et que la masse salariale participe pour 70% des coûts d'exploitation et d'autre part, que le génie civil intervient pour 70% des coût de construction d'une ligne de métro, le concept du Véhicules automatique léger (VAL) apparaît en 1968, avec un cahier des charges

simple devant éluder les problèmes récurrents aux transport en commun tout en offrant une alternative viable à l'automobile : une vitesse commerciale et une fréquence suffisamment élevée, y compris en heure creuse afin d'être attractif; une capacité d'insertion dans un environnement difficile (fort dénivélé, courbe serrée...); des stations et des rames courtes afin de diminuer les coûts d'investissement. Un concours fut lancé et Matra retenu en 1971. Il fallait ensuite trouver un site et d'expérimentation et de mise en œuvre et valorisation commerciale. En 1972, le principe d'une liaison Villeneuve-d'Ascq-Lille est adopté. Celle-ci ne rentrera cependant en service que près de 10 ans plus tard (1983). Entre-temps, la première application commerciale d'un métro automatique, comparable au VAL, sera réalisée à Kôbe au Japon en 1980.

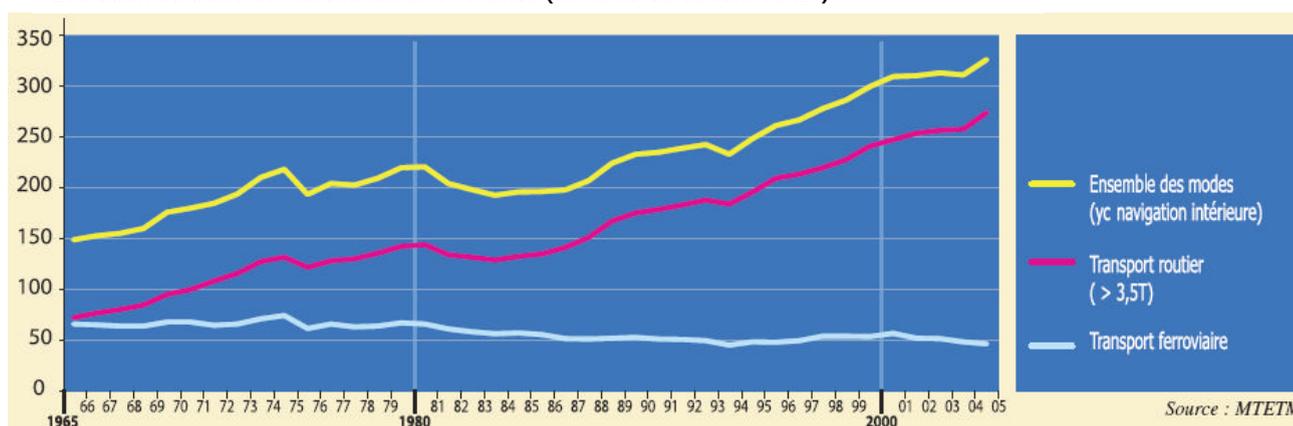
Depuis lors, le concept de métropolitain automatique n'a cessé de se diffuser. L'application qui en est faite à Lyon depuis le début des années 1990 est remarquable. Inaugurée en 1991, le Métro Automatique à Grand Gabarit de l'Agglomération Lyonnaise (MAGGALY) est une ligne entièrement automatisée qui relie le Nord-Ouest de Lyon (Gare de Vaise) au Sud-Est de Lyon (gare de Vénissieux) en passant par le centre de Lyon (place Bellecour) et son quartier du 16^{ème} siècle (Vieux Lyon). Il s'agit de la première ligne de métro de province en terme de fréquentation : 270 000 voyageurs/jour. Surtout, elle fut la première ligne métropolitaine automatique à grand gabarit du monde.

LES TENDANCES DU SECTEUR DES TRANSPORTS AUJOURD'HUI EN FRANCE

Evolution du trafic de voyageurs en France (en milliards de voyageurs-km)



Evolution du trafic de marchandises en France (en milliards de tonnes-km)



Source : CGPC, 2006

Le marché des transports

Depuis une trentaine d'années, à l'instar de l'évolution du PIB, la croissance des trafics a été nettement plus forte que celle de la population

Les données concernant les transports intérieurs de la France distinguent les personnes des marchandises. Dans les deux cas, on constate que une forte croissance du trafic depuis le début des années 1970, mesurée en milliards de voyageurs-

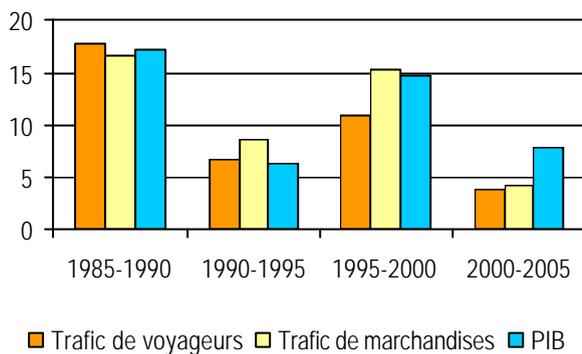
kilomètre¹ et en milliards de tonnes-kilomètre² : +120% pour le trafic de voyageurs, +85% pour le trafic de marchandises environ (Conseil général des ponts et chaussées, 2006). Cette progression est bien supérieure au rythme d'accroissement de la population française entre 1970 et 2004 qui s'élève à près de 20%. En revanche, l'évolution des trafics est proche de celle du PIB de la France : entre 1980 et 2004, cette dernière se caractérise par une

¹ Unité de mesure qui équivaut au transport d'un voyageur sur une distance d'un kilomètre.

² Unité de mesure correspondant au transport d'une tonne sur une distance d'un kilomètre.

croissance de 68%, croissance équivalente à celle que l'on peut observer pour le trafic de voyageurs tandis que le trafic de marchandises connaît un accroissement inférieur (+50% environ). On constate d'ailleurs une forte sensibilité de la croissance des trafics de voyageurs et de marchandises aux fluctuations de l'évolution du PIB.

Taux d'évolution par période des trafics de voyageurs et de marchandises et du PIB en France (en%)



Source : <http://www2.equipement.gouv.fr/statistiques/>

Enfin, on remarque que cette croissance des trafics est alimentée en majeure partie par la croissance des trafics routiers ; plus précisément, les trafics de voitures particulières dans le cas du trafic de personnes. Autrement dit, l'essor des trafics traduit d'abord la montée en puissance d'un certain mode de transport : la route.

La prédominance des transports routiers sur les autres modes

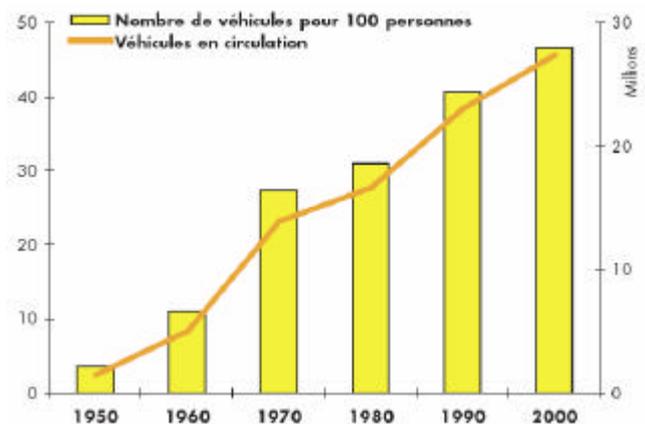
Plusieurs éléments de contexte expliquent l'évolution de la répartition modale.

⇒ *Le règne de l'automobilité pour les transports de personnes*

Plus que les activités économiques, ce sont donc les activités des ménages qui alimentent la croissance des trafics. Ce constat exprime l'évolution selon laquelle la mobilité est devenue un service accessible au plus grand nombre, grâce à la

démocratisation de l'automobile : entre 1950 et 2000, le nombre de voitures particulières en circulation en France a été multiplié par plus de dix. Le nombre de voitures particulières est passé de 274 pour 1000 français en 1973 à 486 en 2002 et le taux d'équipement des ménages en voitures a progressé de 62% (dont 10% en multi-équipement) en 1973 à 79% (dont 30% en multi-équipement) en 2002 (CAS, 2006).

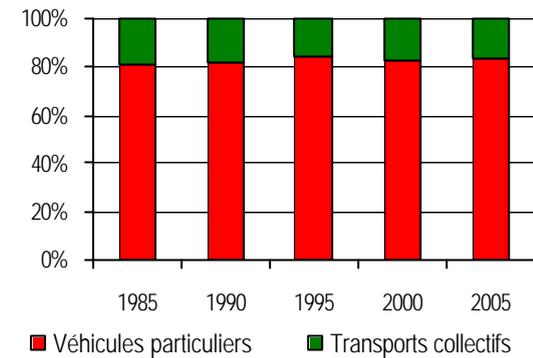
Evolution du nombre de voitures en circulation en France entre 1950 et 2000 (en millions de véhicules et en nombre pour 100 personnes)



Source : Sofres, CCFA, Inrets, Insee

De fait, la part du trafic automobile dans l'ensemble du trafic de voyageurs n'a cessé de progresser jusqu'à aujourd'hui : entre 1985 et 2005, elle est encore passée de 81% à 83,5% (Ministère de l'équipement, 2006). Toutefois, cette évolution est moins tranchée qu'on peut le penser. Depuis 1995, le poids du trafic automobile a tendance à fluctuer entre 83 et 84,5%.

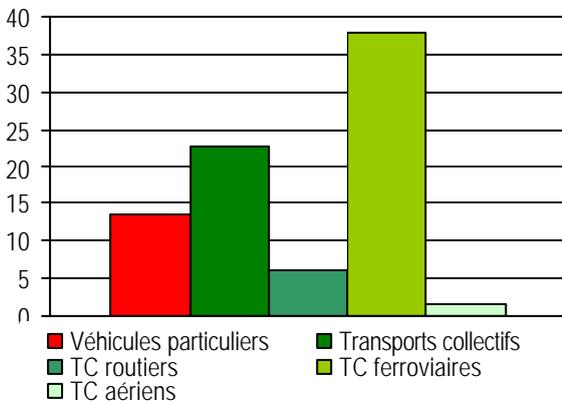
Evolution de la composition du trafic de voyageurs en France (en %)



Source : <http://www2.equipement.gouv.fr/statistiques/>

Depuis le milieu des années 1990, les trafics générés par les transports collectifs connaissent une croissance plus vive que celle du trafic de véhicules particuliers : +23% contre +13,5%. Cette dynamique nouvelle des transports collectifs est principalement alimentée par les transports ferroviaires. On observe ainsi le succès des transformations qu'a connu ce secteur durant la période récente : développement des réseaux TGV, régionalisation de la gestion des réseaux TER. Cette évolution s'est faite au détriment des lignes aériennes intérieures dont la croissance du trafic est marginale entre 1995 et 2005.

Taux d'évolution par mode des trafics de voyageurs en France entre 1995 et 2005 (en %)



Source : <http://www2.equipement.gouv.fr/statistiques/>

La primauté de l'automobilité dans le transport de personnes paraît cependant particulièrement solide

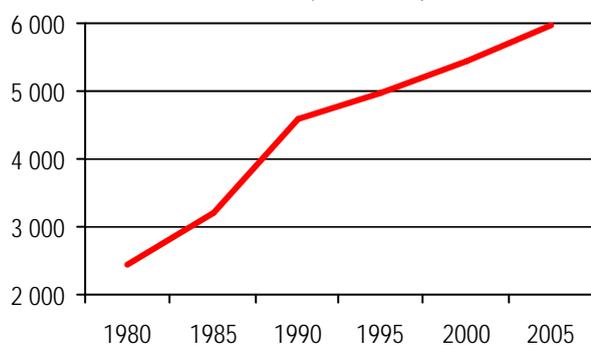
dans la mesure où elle s'inscrit dans un système de transport routier offrant une liberté de déplacement sans équivalent. En effet, la croissance du taux de motorisation des ménages a été fortement stimulé par l'extension du réseau routier du pays dont la longueur totale s'élève aujourd'hui à 610 000 km, dont 25 000 km de routes nationales et 11 000 km d'autoroutes (Ministère de l'équipement, 2006). Conjugées avec l'évolution des modes de vie des Français (individualisation des trajectoires de vie, essor du temps libre...), ces nouvelles possibilités de déplacement se sont traduites par (CGPC, 2006) :

- une modification profonde des conditions de vie avec le développement de l'habitat périurbain de plus en plus éloigné des principaux centres d'activité. En l'espace de 20 ans, la distance moyenne des déplacements quotidiens s'est considérablement accrue, notamment ceux concernant les liaisons domicile-travail : en moyenne, les Français parcouraient 35,5 km par jour en 1994, au lieu de 16,3 en 1973. Le budget-temps transport n'a cependant pas changé car l'allongement des distances a été compensé par une vitesse des déplacements plus importante. On comprend que cette dilution de l'urbanisation permise par l'automobilité contribue en retour à alimenter les trafics de véhicules particuliers, le recours à l'automobile étant devenu indispensable ;
- une forte croissance des déplacements de loisirs et de tourisme, compte-tenu de l'augmentation du temps libre, du nombre des retraités et de la richesse, avec un développement de séjours plus fréquents et plus éloignés. Le transport est ainsi devenu majoritairement lié à des motifs non contraints.

⇒ *La loi du camion commande le transport de marchandises*

Depuis le milieu des années 1960, la croissance du trafic de marchandises s'est construite sur celle des flux routiers. Le parc de véhicules utilitaires de la France n'a cessé de s'accroître depuis l'après-guerre. Entre 1980 et 2005, le nombre de véhicules utilitaires (camions, camionnettes, tracteurs routiers) en circulation en France est encore passé de 2,4 à près de 6 millions d'unités, soit une augmentation de près de 150% (CCFA, 2006).

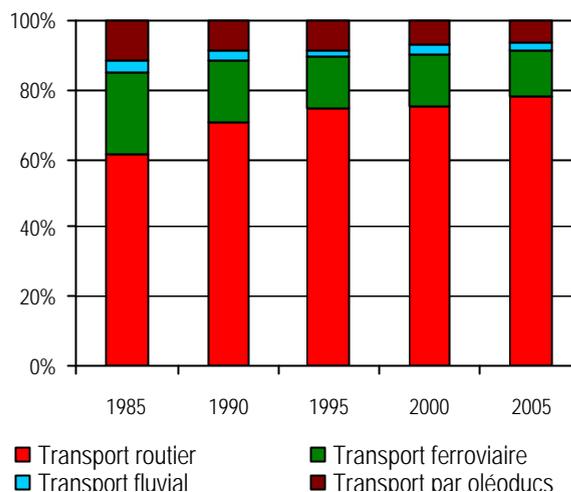
Evolution du nombre de véhicules utilitaires en circulation en France entre 1980 et 2005 (en milliers)



Source : CCFA, 2006

Si la part du trafic routier dans l'ensemble du trafic de marchandises est moins importante que pour le trafic de personnes, elle connaît en revanche une progression plus affirmée. Entre 1985 et 2005, elle a encore gagné près de 17 points en passant de 61,5% à 78,5% (Ministère de l'équipement, 2006).

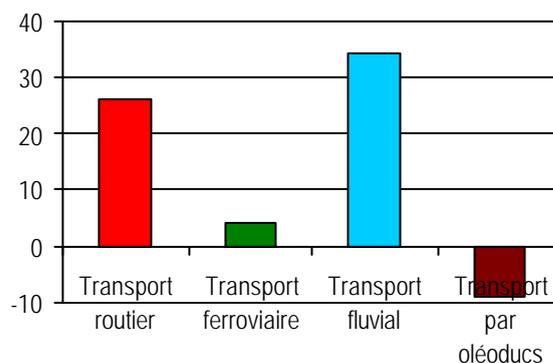
Evolution de la composition du trafic de marchandises en France (en%)



Source : <http://www2.equipement.gouv.fr/statistiques/>

Au vu des tendances récentes, cette progression du poids du trafic routier de marchandises ne semble pas pouvoir être inversée. Durant les dix dernières années (1995-2005), les tonnes-kms transportés par les modes alternatifs à la route n'ont connues qu'une croissance faible : +2,4%. Le transport par oléoducs enregistre un net recul, tandis que le transport ferroviaire voit ses tonnes-kms se réduire depuis 2000 après les avoir accru pendant la deuxième moitié des années 1990. Le transport fluvial quant à lui connaît certes une nette progression mais celle-ci porte sur des quantités restreintes.

Taux d'évolution par mode des trafics de marchandises en France entre 1995 et 2005 (en%)



Source : <http://www2.equipement.gouv.fr/statistiques/>

La force du transport routier de marchandises observée aujourd'hui traduit elle-aussi l'impact d'un certain nombre de choix effectués en matière d'infrastructures de transports. Comme, il est évoqué plus haut, le réseau autoroutier a été largement étendu, passant de 1553 km en 1970 à 11 000 km aujourd'hui, tandis que le réseau ferroviaire a connu un démantèlement continu puisque sa longueur a été réduite de plus de 5 000 km sur la période pour atteindre 30 880 km en 2005. Le réseau des voies navigables est quant à lui resté stable avec 8 500 km environ (Ministère de l'équipement). L'essor du transport routier de marchandises reflète cette priorité donnée à l'autoroute dans l'aménagement du territoire national, laquelle est venue épouser les évolutions caractérisant les processus productifs depuis les années 1970 : externalisation des activités les moins rentables, mondialisation du commerce et de la production, organisation en flux tendus... Autrement dit, la flexibilité du transport routier est devenue une caractéristique intégrante de la majeure partie des stratégies logistiques d'approvisionnement et de distribution des entreprises.

Les enjeux du secteur des transports

Les transports, principaux contributeurs des émissions de CO₂ de la France

Phénomène global, le réchauffement de l'atmosphère terrestre est lié à la croissance des émissions anthropiques de gaz à effet de serre, parmi lesquels figure le dioxyde de carbone (CO₂). Si à l'échelle mondiale c'est le secteur de la production d'énergie qui figure comme le principal

secteur émetteur de CO₂, en France c'est celui des transports qui occupe cette place.

⇒ *Induit par l'élévation des températures, le changement climatique est la principale menace environnementale pour l'humanité au 21^{ème} siècle*

On observe dès aujourd'hui les manifestations d'un changement climatique planétaire qui va s'accroître à l'avenir : changement du régime des précipitations (humidité et aridité accrues), élévation du niveau des mers, multiplication des événements extrêmes (cyclone, sécheresse, inondations...), réduction de la biodiversité... Ces changements climatiques sont liés à l'augmentation des températures de l'atmosphère terrestre : +0,6°C durant le 20^{ème} siècle et entre +1,4 et +5,8°C sont attendus pour le siècle en cours selon le Groupe d'experts intergouvernemental sur les changements climatiques (GIEC, 2001).

Concrètement, l'« évolution plancher » de +1,4°C sur un siècle constitue déjà une élévation importante de la température moyenne : c'est le double de l'augmentation enregistrée au 20^{ème} siècle. La perspective d'une élévation de 5,8°C apparaît quant à elle catastrophique, pour ne pas dire apocalyptique (D.Bourg, 2004 ; J.M.Jancovici, A.Grandjean, 2006). Un écart de 5°C correspond tout simplement à un changement d'ère climatique. L'analyse des précédentes ères glaciaires qu'a connu la planète – baisse de 5°C par rapport aux températures que l'on connaît aujourd'hui – montre que ce type de changement a entraîné à plusieurs reprises des extinctions massives d'espèces, dont certaines ont failli être fatales à la vie sur Terre. Dès lors, quelles peuvent être les conséquences d'une variation thermique de même amplitude orientée cette fois-ci à la hausse ?

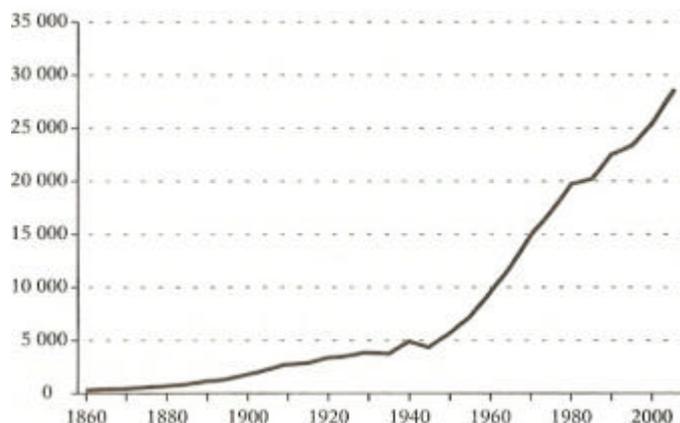
Cette augmentation des températures est due à l'accroissement de la concentration dans l'atmosphère des gaz à effet de serre au delà de ce qui est nécessaire pour la vie humaine¹.

⇒ *Les émissions de gaz carbonique sont principalement le fait de la production et de la consommation d'énergie*

Cet accroissement de la concentration dans l'atmosphère des gaz à effet de serre n'est pas naturel, il résulte de la croissance des émissions de gaz à effet de serre résultant des activités humaines. Parmi l'ensemble de ces émissions anthropiques, celles concernant le dioxyde de carbone (CO₂) en représentent plus de la moitié. Si la déforestation contribue à en accroître le volume annuel – la réduction de la surface forestière diminuant la quantité de CO₂ absorbée continuellement par les végétaux – le gaz carbonique, concrètement, est généré par la production et la consommation d'énergie induites par les activités humaines (Ademe, 2006). La combustion des ressources fossiles (pétrole, gaz, charbon) lors de leur utilisation énergétique finale (carburant, chauffage...) ou de la production d'électricité se traduit en effet par la libération de gaz carbonique dans l'atmosphère. Ainsi, une tonne de charbon libère ainsi 3,7 tonnes de CO₂ (Parlement, 2006).

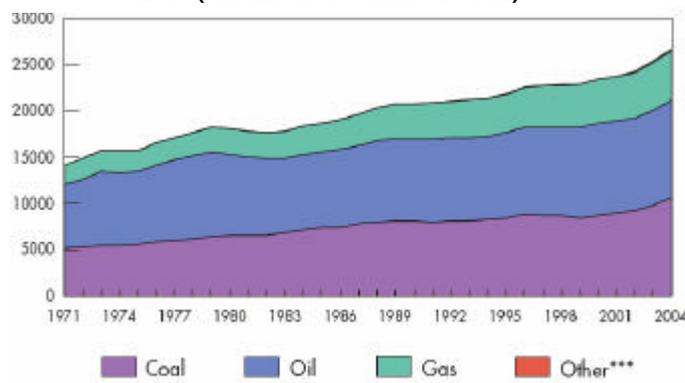
¹ Les gaz à effet de serre – vapeur d'eau, gaz carbonique ou dioxyde de carbone (CO₂), le méthane (CH₄), l'oxyde d'azote (NO_x), le protoxyde d'azote (N₂O), les chlorofluorocarbones (CFC), l'ozone (O₃) – permettent de confiner dans la basse atmosphère une partie du rayonnement solaire (infra-rouge) qui est réfléchi au niveau de la croûte terrestre. Agissant comme les vitres d'une gigantesque serre, les gaz à effet de serre modifient le bilan thermique de la surface terrestre. Si l'ensemble du rayonnement solaire réfléchi par la planète était renvoyée dans l'espace, la température moyenne à sa surface serait de 30°C inférieure à celle dont nous bénéficions aujourd'hui (15°C) : la vie ne serait pas possible !

Evolution des émissions de dioxyde de carbone d'origine fossile depuis 1860 (en millions de tonnes)



Source : J.M.Jancovici, A.Grandjean, 2006

Evolutions des émissions mondiales de CO₂ entre 1971 et 2004 (en millions de tonnes de CO₂)



Source : AIE, 2006

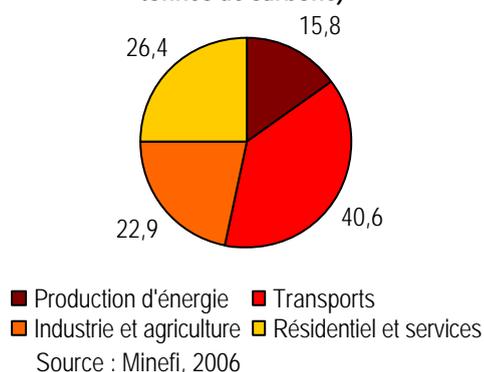
Sensible dès le premier stade énergétique de la révolution industrielle – charbon+machine à vapeur – la croissance des émissions de carbone d'origine fossile a connue une accélération considérable après la deuxième guerre mondiale avec l'essor des consommations pétrolières. Depuis, le seul événement ayant entraîné un ralentissement passager est le choc pétrolier de 1979. Sur la période récente, 1973-2004, les émissions de carbone d'origine fossile sont ainsi passées de 15,7 à 26,6 milliards de tonnes, soit une augmentation de 70%, la consommation mondiale d'énergie primaire s'accroissant de 83% sur la même période (AIE, 2006). Toujours selon l'AIE, à structure de consommation égale, la poursuite la croissance de la demande mondiale d'énergie aboutirait dès 2030

à un doublement des émissions de CO2 par rapport à ce qu'étaient ces émissions en 2000, atteignant ainsi le seuil des 40 milliards de tonnes annuel.

⇒ *En France, les transports constituent le seul secteur dont les émissions de CO2 se sont accrues depuis 1980*

A l'inverse de la tendance mondiale, les émissions annuelles de CO2 de la France liées à la production et à la consommation d'énergie ont baissé depuis le début des années 1970 pour se stabiliser depuis la fin des années 1990 à 105 millions de tonnes environ, alors même que la consommation française d'énergie primaire s'est accrue de 55% sur la période 1973-2005 (Minefi, 2006).

Répartition des émissions de CO2 dues à l'énergie par secteurs en France en 2005 (en millions de tonnes de carbone)

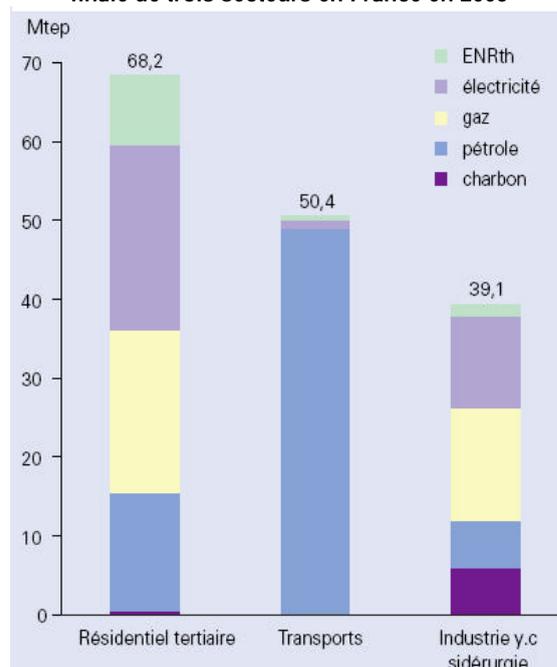


Toutefois, tous les secteurs d'activités de la France ne sont pas engagés dans une réduction de leurs émissions de CO2. En effet, le secteur des transports a connu une très forte croissance de ses émissions de CO2 (+55%) entre 1980 et 2005.

Cette évolution s'explique par la conjonction de deux éléments : d'une part, le transport de personnes et de marchandises repose essentiellement sur la mobilisation des modes routiers – véhicules particuliers et utilitaires – et, d'autre part, les modes routiers sont dépendants du pétrole dans la mesure où il n'a pas été possible

jusqu'ici de substituer à ce dernier une autre source d'énergie aussi efficace pour cette utilisation. Ainsi, en 2005, c'est désormais le secteur des transports qui contribue le plus aux émissions de CO2. Les transports routiers représentent ainsi la plus grande partie des émissions imputées au secteur des transports.

Composition de la consommation d'énergie finale de trois secteurs en France en 2005



« L'immobilité quotidienne », facteur d'exclusion sociale

A l'échelle locale du vécu, la question des transports de personnes se trouve reformulée sous l'angle des pratiques quotidiennes de mobilité. La deuxième moitié du 20^{ème} siècle n'est pas seulement synonyme d'explosion des trafics internationaux liés à la mondialisation de l'économie. La mobilité est aussi devenue une norme sociale, participant de façon centrale à l'individualisation des trajectoires de vie. La croissance de la distance moyenne parcourue quotidiennement se traduit notamment par

l'extension du gisement d'emploi accessible. La mobilité constitue aujourd'hui un levier indispensable des stratégies professionnelles individuelles. La mobilité apparaît comme particulièrement indispensable pour les actifs dont le niveau de qualification est synonyme d'emplois instables : être mobile permettrait de rebondir plus facilement. Or, il se trouve que le potentiel de mobilité des populations défavorisées confine justement à l'immobilité comparativement aux autres catégories sociales. Le défaut de mobilité devient un facteur d'exclusion sociale au même titre que l'absence de logement ou de revenus.

⇒ *La mobilité, outil indispensable dans la société du choix*

Selon bon nombre d'observateurs, être en capacité de se déplacer constitue un moyen important de l'autonomie et de la construction de trajectoires de vie ascendantes. Associée à la démocratisation de l'automobile durant les années 1960 en France, l'extension de l'espace accessible quotidiennement a permis, plus que jamais dans l'histoire, de choisir où nous vivons, où nous travaillons, où nous nous consommons, où nous nous rencontrons... et d'envisager ces choix séparément (L.E. Lomaski, 1995, cité par J.P.Orfeuill, 2004). Autrement dit, l'expansion continue des aires d'échanges apparaît comme un vecteur de développement économique et social.

Moteur du processus d'accession à un habitat individualisé qui s'est développé de façon continue depuis les années 1960, cette approche de l'automobilité présente cependant de réelles limites sur le plan environnemental, à l'échelle locale (bruit, pollution de l'aire, effets de coupures dues aux trafics routiers et à leurs infrastructures...) comme mondiale (forte contribution aux émissions de gaz à

effet de serre, production de déchets encore faiblement recyclés...). Par ailleurs, plusieurs analyses ont montré que la formation du couple lotissement-automobile alimentait finalement une recherche active de l'entre-soi génératrice de ségrégation socio-spatiale.

Plus que les dommages collatéraux de la mobilité, l'angle d'analyse retenu ici conduit à attirer l'attention sur le moment à partir duquel l'accès à la mobilité comme vecteur de choix n'est plus un choix en tant que tel. L'essor de l'automobilité, en effet, n'est pas sans conséquence sur le fonctionnement du système de transport local. Avec la diffusion de l'automobile, l'urbanisme a été de plus en plus pensé pour elle (J.P.Orfeuill, 2004). Tous les acteurs, depuis le commerce jusqu'aux employeurs, ont peu à peu construit leurs stratégies de localisation et de maillage par rapport à l'aptitude croissante à la mobilité permise par l'automobile : les localisations centrales sont moins recherchées de même que la proximité d'une desserte en transport public, tandis que l'attractivité des voies rapides s'accroît. Un exemple significatif est celui des commerces d'alimentation générale : leur nombre a été divisé par six en trente ans au profit du développement du grand commerce installé en périphérie des agglomérations, c'est à dire dans des lieux qui reportent les tâches de distribution finale sur les acheteurs. Dans ce cadre, les pratiques de mobilité suggèrent l'apparition d'une véritable dépendance à l'automobilité (G.Dupuy, 1999), elle seule pouvant offrir les capacités d'autonomie qu'exige l'accès aux différentes aménités urbaines. En d'autres termes, la capacité de mobilité, et le plus souvent de mobilité autonome via l'automobile, n'est plus seulement synonyme de liberté. Elle est devenue une obligation, un

prérequis, une condition nécessaire (bien que non suffisante) d'une inscription normale dans la vie sociale, à mesure que nombre de fonctions assurées il y a une ou deux décennies par le voisinage exigent aujourd'hui la pratique de territoires beaucoup plus vastes.

⇒ *L'accès à l'emploi suppose que les actifs les moins qualifiés possèdent une aptitude à la mobilité supérieure...*

Si l'on se focalise sur la question essentielle de l'accès à l'emploi, on constate que l'aptitude à la mobilité est d'autant plus incontournable que les actifs concernés sont faiblement qualifiés.

Jusqu'à la fin des trente glorieuses, la forte stabilité de la relation à l'emploi permettait aux salariés de s'installer à proximité de leur lieu de travail. Les bassins d'emploi se superposaient aux bassins de vie. Les besoins de mobilité étaient donc réduits. Ce chevauchement des zones d'emplois et des zones d'habitation est aujourd'hui perturbé (E.Le Breton, 2005) : pour des raisons choisies, avec l'essor de l'habitat périurbain qui provoque une mise à distance du lieu de travail ; pour des raisons subies, dans la mesure où l'emploi est devenu moins sûr du fait du rythme d'activité plus chaotique et des stratégies de délocalisation des entreprises. De fait, dispersion des lieux d'habitat et changement plus fréquent d'emploi conduisent à faire de la capacité de mobilité une variable d'ajustement essentielle au quotidien. Ainsi, entre 1975 et 1999, la distance moyenne entre le lieu d'habitation et le lieu de travail est passée de 7 à 13 kilomètres (J.P.Orfeuill, 2004).

Il se trouve que certaines populations sont dans la situation où, simultanément, elles n'ont pas le choix de leur lieu d'habitat – elles n'ont pas la maîtrise de la distance qui les sépare de leur lieu d'emploi – et

sont soumises à taux d'instabilité de l'emploi les plus élevés – elles sont assujetties aux postes à faible valeur ajoutée, c'est à dire totalement dépendant du niveau de l'activité. Dans ce cadre, ces populations qui cumulent faibles niveaux de formation et de salaire et conditions d'habitat dégradées, font face à un fractionnement du travail (contrats à durée déterminée, intérim, temps partiels, horaire décalés) qui leur impose des déplacements plus nombreux et plus dispersés. Autrement dit, elles sont appelées à se munir d'une capacité de mobilité supérieure à celle demandée au reste des actifs.

Or, d'une manière générale, les populations précaires ont de plus faibles moyens de mobilité. Dès lors, outre les situations logiques de non possibilité de se rendre sur le lieu de la mission de travail proposée, il arrive que des personnes abandonnent leur emploi, qui leur convenaient et pour lequel elles étaient compétentes, parce que la contrainte de l'obligation répétée de découvrir les trajets, de la fatigue de la durée des aller-retour et de leur coût... les dissuade de continuer. Parce qu'un emploi difficilement accessible peut coûter davantage qu'il ne rapporte, la mobilité peut ainsi être une dimension des trappes à inactivité (E.Le Breton, 2005). L'arbitrage du côté de la non-activité professionnelle devient alors possible : près d'un tiers des personnes suivies par des structures d'insertion enquêtées par E.Le Breton (2005) ont abandonné un emploi en raison de difficultés de déplacements.

⇒ *... Mais les capacités de mobilité quotidienne sont inégalement réparties*

Plusieurs ouvrages récents s'attachent à décrire cette réalité de plus en plus prégnante : l'horizon des possibles dans l'accès aux ressources de la ville n'est pas le même pour chaque catégorie de

population. La hiérarchie sociale encadre fortement la liberté de choisir ses différents lieux de vie. Plusieurs schémas type peuvent être distingués (E.Le Breton, 2005).

Pour les personnes bénéficiant de situations sociales et professionnelles garanties, l'archipel des lieux de vie associe souvent le domicile situé dans un quartier agréable, plusieurs lieux de travail (le bureau à la maison, le bureau dans l'entreprise, celui des clients), une maison de campagne pour le week-end et des lieux de vacances qui changent tous les ans. L'archipel des classes moyennes, quant à lui, est en général plus étroit puisque composé d'un domicile en périphérie d'agglomération, d'un seul lieu de travail et d'un lieu de vacances qui se renouvelle moins. Les pratiques territoriales des personnes en situation précaire sont encore plus contraintes. En fait d'archipel, ces personnes ne pratiquent qu'une seule île, de dimension réduite, qui reste toujours la même et dont ils ne peuvent guère s'échapper.

Plus précisément, lorsque l'on sait que l'acquisition, l'entretien, l'assurance et l'usage d'une voiture coûtent en moyenne 5000 euros par an, que le salaire annuel minimum est de l'ordre de 11 000 euros par an, qu'il y a 14% de salariés au smic et un peu plus de 4 millions de personnes à « bas salaires » (percevant moins de 1,3 smic, seuil retenu pour les allègements de charges sociales des employeurs), et que le nombre de chômeurs est supérieur à 2 millions, il n'est pas étonnant qu'une partie de la population ne possède toujours pas de véhicule (J.P.Orfeuil, 2004). Certes, la France est, avec l'Italie, le pays d'Europe où l'absence de voiture dans les ménages est la plus rare (21%). Cette proportion s'élève cependant à 39% chez les ménages pauvres. Surtout, cette donnée n'est

qu'imparfaitement compensée par l'accès aux transports publics : 22% des français ne sont pas desservis par des réseaux de transports en commun contre 13% dans les pays nordiques et 15% en Grande-Bretagne. De fait, comme le souligne J.P.Orfeuil (2004), 18% des actifs modestes vont travailler à pieds (contre 11% en moyenne), 10% y vont en deux-roues (contre 5% en moyenne), 16% utilisent les transports publics urbains (contre 11% en moyenne). Ils sont en revanche beaucoup moins nombreux à utiliser la voiture (52% contre 69%). En d'autres termes, les actifs pauvres se positionnent sur des aires d'emplois plus restreintes que les salariés plus aisés, alors que la pérennité de leur relation à l'emploi supposerait l'inverse. Au total, des ménages modestes aux ménages aisés, les distances parcourues un jour de semaine sont multipliées par deux.

Si un effort important de desserte en transports en commun des quartiers concentrant les populations précarisées a été conduit dans le cadre de la politique de la ville, on constate que la géographie des flux tend à renforcer le handicap de ces quartiers : les flux radiaux entre le centre et la périphérie ne représentent aujourd'hui plus qu'un tiers de l'ensemble des déplacements, les trafics tangentiels entre les couronnes de l'agglomération s'étant sensiblement accru, ainsi que les flux d'échanges entre l'agglomération et les communes périurbaines environnantes. Autrement dit, principalement conçus pour assurer les liaisons radiales, les réseaux de transports en commun ne permettent pas l'accès à une bonne partie des ressources de la ville. On observe par ailleurs que la question de l'accès à la mobilité se pose désormais pour un nouveau type de territoire : les

marges extérieures des zones périurbaines. Il s'agit des communes qui accueillent justement la plus grande partie des populations qui parviennent à quitter les quartiers défavorisés pour réaliser un projet d'accession à la propriété. Ce dernier ne peut en effet se réaliser qu'au sein de couronnes périphériques de plus en plus éloignées des agglomérations où reste concentré l'emploi. Dès lors, à l'effort important consenti à l'achat immobilier, s'ajoute celui consacré aux déplacements quotidiens vers le lieu de travail. Le risque est grand de voir se reproduire le sentiment d'insularité que connaissent les populations non motorisées des quartiers d'habitat social, l'utilisation de la voiture étant réduit au strict nécessaire. Plus grave, le budget transport peut constituer une bombe à retardement dans un contexte d'accroissement du prix de l'énergie.

La prise en charge de la question de l'aptitude à la mobilité reste donc imparfaite. Alors que le droit au transport figurait déjà dans la loi d'orientation des transports intérieurs (LOTI) de 1982, force est de constater que c'est l'excès de trafic qui mobilise toutes les attentions (J.P.Orfeuill, 2004). Alors que l'équipement automobile des ménages continue de croître, suggérant que les difficultés de déplacements rencontrées aujourd'hui par certaines catégories de population seront résolues par cette tendance naturelle, la question sociale reste focalisée sur la question du logement et celle des minima sociaux.

LES DEFIS TECHNOLOGIQUES DE L'AVENIR DES TRANSPORTS

Dans la perspective des tendances actuelles, le secteur du transport de personnes et de marchandises est donc appelé à relever un double défi : proposer des réponses à la croissance à venir de la demande de déplacements ; réduire son impact environnemental sur le plan des émissions de CO₂. Les travaux en matière de prospective des transports suggèrent que la prise en charge technique de ces enjeux repose sur deux principaux leviers : la maîtrise de la demande d'énergie par l'utilisation de modes de transports plus efficaces et la mise en œuvre de stratégies de maîtrise de la demande déplacements elle-même ; la promotion de carburants, de motorisations et, plus largement, de modes de transports moins émetteurs de CO₂ que les véhicules à moteurs thermiques classiques.

Premier levier technologique : systématiser les économies d'énergies

L'énergie la moins polluante et la moins coûteuse est assurément celle qui n'est pas consommée. Moins consommer ne renvoie pas seulement à la capacité de chaque agents économiques de réduire ses besoins à technologie constante : la limitation de la consommation énergétique par le rationnement ou par la hausse des prix se heurte à un problème d'acceptation sociale dans la mesure où l'énergie est facteur de qualité de vie. Aussi, l'objectif de réduction des consommations d'énergie appelle fortement la mise au point de technologies permettant aux activités humaines (transports,

chauffage, production industrielle, production d'électricité...) de s'effectuer en recourant de façon toujours moins intense à l'énergie. Si cette stratégie doit s'appliquer en priorités aux énergies les plus émettrices de CO₂, c'est à dire les énergies fossiles, elle présente un intérêt plus général dans la mesure où elle constitue la voie à suivre pour anticiper la sortie de l'ère de l'énergie bon marché ; autrement dit, les économies d'énergies doivent aussi être considérés comme un facteur de compétitivité pour l'économie française.

Pour de nombreux observateurs, l'amélioration de l'efficacité de l'utilisation de l'énergie constitue le levier à mobiliser en priorité pour relever le défi énergétique du 21^{ème} siècle. Soulignant que les effets d'une relance des politiques de ce type peuvent commencer à se faire sentir en 5 ans, P.Radanne (2005) rappelle également que si la stratégie d'économie d'énergie conduite par la France durant les années 1970 et jusqu'au milieu des années 1980 avait été poursuivie, notre pays connaîtrait aujourd'hui une demande énergétique stable tout en parvenant à nourrir une croissance économique de près de 2% par an.

Toutefois, il reste difficile d'établir des prévisions d'économie d'énergie fiables dans la mesure où l'économie réalisée par unité d'énergie consommée peut être utilisée pour satisfaire de nouveaux besoins énergétiques. En effet, les scénarios montrent, en prolongement d'une tendance historique, que le pouvoir d'achat augmente plus vite que le prix des énergies sur le long terme (Groupe « Facteur 4 », 2006).

Quoi qu'il en soit, les dispositifs d'économie pouvant être mise en œuvre à court terme dans le secteur des transports concernent : la réduction de la puissances des véhicules ; l'amélioration des moteurs conventionnels ; la diffusion de la motorisation hybride ; l'extension des réseaux de transports en commun et de pistes cyclables. La mise en œuvre de politiques d'urbanisme durable ne peut en revanche produire ses effets que dans la longue durée.

Le secteur des transports : développer des véhicules plus économes en carburants

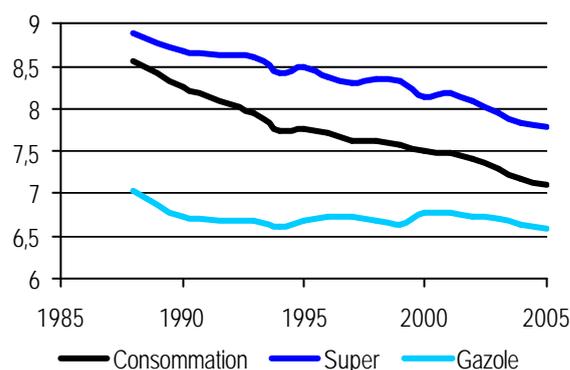
Le secteur des transports est celui dont les émissions de CO₂ ont le plus augmenté depuis trente ans, pour représenter 38,5% de l'ensemble des émissions de la France en 2005. Cette évolution traduit les limites de la stratégie de substitution de l'électricité d'origine nucléaire au pétrole engagée par la France à partir des années 1970. Le secteur des transports demeure en effet fortement consommateur de pétrole – énergie fortement émettrice de CO₂ – dans la mesure où, malgré les chocs pétroliers, le transport routier est devenu le principal contributeur des trafics de personnes et de marchandises : en 2005, les véhicules particuliers génèrent 83,5% des trafics de personnes, quand les transports routiers représentent 78,5% de ceux de marchandises (Ministère de l'équipement, 2006).

Ainsi, alors que tous les autres secteurs d'activités (production, d'électricité, industrie, résidentiel et services, agriculture) ont vu leur consommation de pétrole reculer ces dernières décennies, celle du secteur des transports est passée de 25,7 à 48,9 millions de Tep entre 1973 et 2005 ; la part de ce secteur dans la consommation finale de pétrole de

la France est ainsi passée de 30% à 68% sur la période (Minefi, 2006).

Pour autant, cette augmentation des consommations d'énergie du secteur des transports aurait été supérieure si les véhicules terrestres n'avaient pas connu une réelle amélioration de la sobriété de leurs motorisation durant la même période, en raison de l'évolution progressive de la réglementation. Pour ce concerne les poids lourds, on constate que leur consommation moyenne est aujourd'hui de 25 litres de diesel aux 100kms alors qu'elle s'élevait à 55 litres dans les années 1950 (T.-G. Breton, P. Kapferer, 2005). Entre 1988 et 2005, la consommation moyenne de carburant aux 100 km des véhicules particuliers neufs, quant à elle, a baissé de 17%, avec une réduction plus forte pour le super que pour le gazole, même si les moteurs diesel ont une consommation moyenne nettement inférieure à celle des moteurs essence (Minefi, 2005 ; CAS, 2006).

Evolution de la consommation des véhicules particuliers aux 100 km en France entre 1988 et 2005 (en litres)

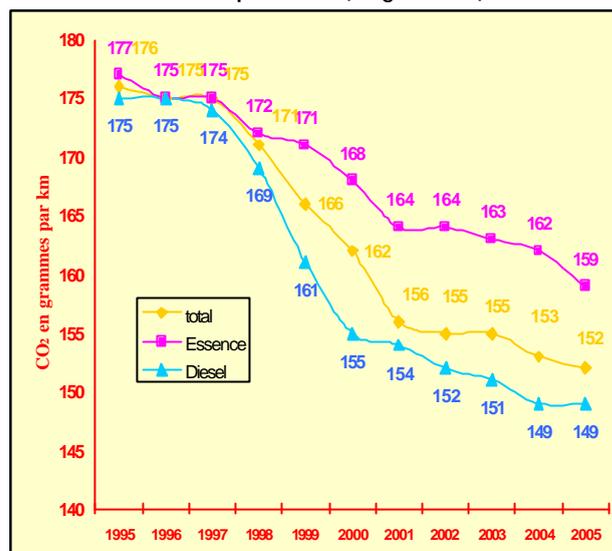


Source : Minefi, 2005

Cette évolution se traduit logiquement par une réduction des émissions moyenne de CO₂ par km parcouru pour les véhicules neufs : entre 1995 et 2005, celles-ci sont passées de 176 à 152 grammes (-13,5%). Cette exigence de réduction des émissions de CO₂ par km est encadrée au niveau

européen depuis le milieu des années 1990 par l'accord volontaire des constructeurs européens avec l'union européenne¹ (CAS, 2006). Hélas, ces efforts ont été annulés par l'augmentation du nombre², du poids moyen³ et des vitesses de pointe⁴ des véhicules, la diffusion de la climatisation⁵, et plus largement l'accroissement des trafics.

Evolution du taux moyen d'émissions de CO₂ par km des véhicules particuliers neufs vendus en France depuis 1995 (en grammes)



Source : Ademe, 2006

De ce point de vue, la poursuite du développement de motorisations moins consommatrices de carburants⁶ ne pourra se traduire à l'avenir par une réelle baisse des émissions de CO₂ du secteur des transports en l'absence de mesures concomitantes de réduction de la puissance unitaire des moteurs et de substitution modale au profit de moyens de transport économes en énergie (cf. point suivant). Ces évolutions sont d'autant plus fondamentales et urgentes que : tous les scénarios de réduction par 4 des émissions de CO₂ de la France impliquent que la part du pétrole dans les transports devienne inférieure à 1/3 de l'énergie finale du secteur (MIES, 2004) ; le renouvellement complet du parc automobile nécessite une période de 20 à 30 ans (Parlement, 2005).

⇒ Une mesure générique pour l'ensemble des transports terrestres : le « downsizing » des puissances de motorisation

¹ Un accord volontaire de réduction de ces émissions a été conclu entre l'Union européenne et l'Association des constructeurs automobiles européens (ACEA) qui vise la diminution de 25% en 2008 du niveau constaté en 1995 (soit 140g/km contre 186g/km) et prévoit une étape supplémentaire en 2012 avec -35% (soit 120g/km). La moyenne des constructeurs français se situait en 2003 à 148,5g/km, en comparaison, alors que le taux des véhicules particuliers est de 205g/km aux Etats-Unis (CES, 2006).

² Le nombre de voitures particulières est passé de 274 pour 1000 français en 1973 à 486 en 2002 et le taux d'équipement des ménages en voitures a progressé de 62% (dont 10% en multi-équipement) en 1973 à 79% (dont 30% en multi-équipement) en 2002 (CAS, 2006).

³ En raison de l'amélioration de la sécurité et du confort des véhicules, la masse des véhicules particuliers circulant en France en a augmenté de 15 kg en moyenne par an depuis 1984, soit un poids moyen qui est passé de 900 à 1 200 kg environ (Parlement, 2005).

⁴ Depuis 1984, la puissance moyenne (kW) des véhicules particuliers circulant en France a augmenté de 38% (Parlement, 2005).

⁵ Autrefois réservée aux véhicules hauts de gamme, la généralisation de la climatisation dans les véhicules neufs entraîne en moyenne un surplus de consommation de 1 litre de carburant pour 100 kilomètres (CES, 2006).

⁶ Notamment pour les véhicules particuliers qui représentent 57% de la consommation de produits pétroliers des transports routiers de personnes et de marchandises en 2004 (Ministère de l'équipement, 2006).

Il s'agit d'un fait incontestable, les véhicules particuliers les plus légers, c'est à dire les moins luxueux, sont les moins consommateurs d'énergie au km et donc les moins émetteurs de CO2 (Ademe, 2006). Comme le suggère P. Radanne (2005), un compromis devra être trouvé entre la liberté individuelle de déplacement et la réduction des émissions de gaz carbonique, au travers de la redescende en gamme des véhicules et une limitation accrue des vitesses autorisées.

Moyennes des émissions de CO2 par km des véhicules neufs vendus en France par type de carrosserie (en grammes)

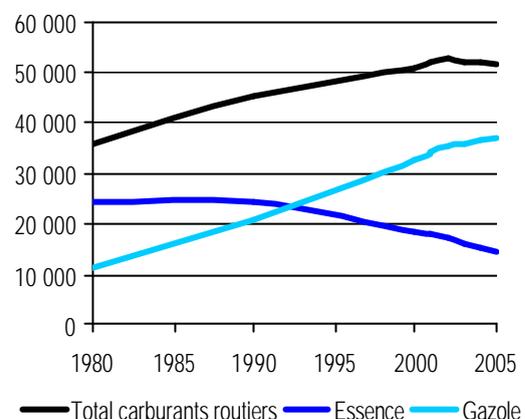


Cette évolution peut être réalisée tout en maintenant la puissance et le couple des moteurs grâce à la généralisation de la suralimentation par turbocompresseur. Il s'agit d'un dispositif qui permet de récupérer l'énergie disponible à l'échappement sur une turbine pour entraîner un compresseur, qui introduit l'air d'admission sous pression. L'augmentation de la quantité d'air introduite permet alors de brûler d'avantage de carburant et donc de produire plus d'énergie. Le remplacement d'un moteur atmosphérique par un moteur turbocompressé permet théoriquement de réduire de 21% la consommation d'un moteur fonctionnant à l'essence (Parlement, 2006)

⇒ *L'amélioration des moteurs conventionnels*

Le moteur à combustion interne reste, selon tous les experts consultés, la pierre angulaire de l'automobile pour plusieurs décennies encore. Dès lors, l'enjeu de la réduction des émissions de CO2 passe par la conception de voitures conventionnelles consommant de moins en moins de carburants. Selon l'IFP, la principale source d'économie de carburant renvoie à l'amélioration du rendement du moteur, et plus largement de la chaîne de traction (Parlement, 2005).

Evolution de la consommation annuelle de carburants en France entre 1980 et 2005 (en millions de litres)



A cet égard, les moteurs diesel présentent un intérêt supérieur, puisque leur rendement est plus élevé que celui des moteurs à essence ou à gaz. La diésélisation du parc – la part des moteurs diesel dans les ventes annuelles de véhicules particuliers en France est passée de 33% à 69% entre 1990 et 2005 (Ademe, 2006) – a déjà permis de limiter significativement les consommations et les émissions globales de gaz à effet de serre (CCFA, 2006). Il paraît donc pertinent de favoriser le renforcement de la part des véhicules diesel dans le parc d'automobiles particulières, à la condition de garantir l'approvisionnement en carburant par la substitution croissante du gazole par des biocarburants (Parlement, 2005).

Sur un plan strictement technologique, les performances du moteur diesel reposent sur la maîtrise de l'injection directe à haute pression et de la suralimentation permettant le « downsizing » (réduction de la puissance du moteur sans pertes de performances mécaniques). Dans ce cadre, les progrès futurs reposent sur quatre voies principales (Parlement, 2005 ; CES, 2006) :

- L'amélioration de l'injection directe :

Elle doit permettre d'optimiser le mélange air/carburant. Elle est d'autant plus efficace que le carburant est sous pression, injecté de la manière la plus précise possible en termes de quantité et de moment. Pendant de nombreuses années l'injection était assurée par un système mécanique lié à chaque cylindre qui assurait en même temps la mise sous pression ; les quantités et le moment de l'injection n'étaient donc pas modulables. Une évolution sensible a été effectuée par les systèmes d'injection électronique qui ont permis de séparer la mise sous pression de l'injection. La mise sous pression continue d'être réalisée de manière mécanique, tandis que les injecteurs commandés électroniquement libèrent ou non le trou d'injection par une impulsion électromagnétique. L'injection électronique a également permis de mettre au point une injection multiple : au lieu d'injecter en une seule fois le carburant, celui-ci est introduit dans le cylindre en plusieurs fois, de trois à cinq actuellement. Ces injections ont pour objectif de réduire les bruits de cliquetis, de mettre sous pression la chambre, d'assurer le meilleur mélange et la meilleure combustion possible et enfin de maintenir une pression

élevée. Elles permettent donc de réduire le bruit, d'augmenter le rendement du moteur et d'en diminuer les émissions polluantes. Ces dispositifs pointus ne peuvent fonctionner que grâce à de nombreux capteurs permettant de connaître l'évolution exacte du fonctionnement du moteur (température, pression, position du piston) mais aussi du circuit d'échappement (taux d'imbrûlés...).

- L'amélioration de la suralimentation :

Elle consiste à équiper la turbine du turbocompresseur d'un système à géométrie variable, des ailettes orientables déviant le flux des gaz entrants. Leur orientation est pilotée par un calculateur qui optimise la récupération de l'énergie en fonction du régime du moteur. Le couple du moteur est ainsi plus élevé à haut comme à bas régime.

- La réduction des frottements :

La chasse aux frottements fait aussi partie des sources d'amélioration continues du rendement des automobiles. De nombreuses recherches sont effectuées sur la réduction des frottements dans les moteurs, et en particulier dans les pistons. Par ailleurs, les manufacturiers de pneumatiques travaillent à la réduction de la résistance au roulement et ont déjà obtenu des avancées significatives grâce notamment aux évolutions de structure des carcasses et des mélanges de gomme.

- La mise au point d'un nouveau mode de combustion :

Une rupture plus nette pourrait être atteinte en cas de succès des programmes de recherche engagés au niveau international sur le mode de combustion. Deux programmes européens intitulés HCCI (Homogeneous Combustion

Compression Ignition) pour le diesel et CAI (Controlled Auto Ignition) pour l'essence visent à contrôler le temps d'autoallumage, la vitesse et la température pour optimiser le mélange et la combustion. Ils projettent une réduction de l'ensemble des émissions polluantes de 90% par rapport aux moteurs actuels, à l'horizon 2015-2020.

⇒ *La voiture hybride, une technologie clef à moyen et long termes*

L'hybridation consiste à combiner deux énergies pour assurer la propulsion d'un véhicule. On appelle donc hybride tout véhicule qui, en plus de sa source d'énergie primaire, dispose d'un stockage réversible d'énergie sous une seconde forme. Sur les véhicules hybrides actuels, il s'agit essentiellement du mariage du thermique comme source principale d'énergie et de l'électrique comme complément ; mais cette solution est aussi utilisée pour les voitures à hydrogène qui sont également des hybrides électrique-hydrogène. L'adjonction d'un moteur électrique et d'une puissante batterie permet d'optimiser le fonctionnement du moteur thermique ou de le remplacer momentanément et donc de réduire la consommation et les émissions. Toute la difficulté technique est de réussir un fonctionnement bimode harmonieux et pour un coût limité. Il existe plusieurs niveaux et fonctionnalités d'hybridation du soft au full, généralement dénommés par leur terminologie anglo-saxonne (Parlement, 2005).

- Le premier niveau correspond au « Stop & start » de Valeo commercialisé sur la Citroën C3. A l'arrêt, un dispositif électrique, un alternodémarrreur, permet la mise en veille du moteur et le redémarrage après relâchement de la pédale de frein. Ce dispositif permet de réduire les émissions de CO2 de 8% en moyenne.

- Le second niveau ajoute le freinage récupératif. Il consiste à récupérer l'énergie cinétique du véhicule lorsque la voiture freine ou décélère, au lieu de la dissiper sous forme de chaleur dans les freins. Cette énergie est stockée dans une batterie appropriée et restituée ensuite. Très difficile à réaliser dans la pratique, cette opération permet de réduire les émissions de CO2 de 13% en moyenne.

- Une troisième fonctionnalité est l'optimisation du moteur thermique. Le principe est de le faire tourner à son niveau de rendement optimal, de stocker l'énergie dans les batteries lorsqu'elle est excédentaire et de la restituer lorsqu'elle est insuffisante, notamment dans les phases d'accélération. Le moteur électrique permet un surcroît de puissance et évite la surconsommation du moteur thermique au moment de l'accélération. L'hybridation peut donc également permettre de diminuer la cylindrée du moteur thermique pour arriver à des réductions d'émissions de l'ordre de 30%.

- Enfin, un véhicule hybride peut être propulsé entièrement en mode électrique sans intervention du moteur thermique (fonction « E-drive » sur la Toyota Prius). Ce dispositif complet devrait permettre de réduire les émissions de CO2 de 45% en moyenne.

L'hybridation offre ainsi une réponse de taille aux problèmes de surconsommation posés par l'utilisation des véhicules en cycle urbain, utilisation qui représente 70% des trajets automobiles. L'utilisation urbaine, et plus largement les courts trajets (50% des déplacements automobile ne dépassent pas les 3 kms), renvoient à des situations dans lesquelles le moteur met du temps à atteindre sa température normale de

fonctionnement, avec pour conséquence le fait qu'un véhicule roulant à 10 km/h émet, pour parcourir la même distance, trois fois plus de gaz à effet de serre qu'un véhicule roulant à 60 km/h.

Parmi les hybrides les plus aboutis, disponibles à l'achat dans les concessions, se trouvent les modèles produits par les constructeurs japonais Honda et Toyota, et notamment la Toyota Prius Hybrid Sinergy drive qui sélectionne constamment la source d'énergie (essence ou électricité) la plus rentable en fonction du type de déplacement. (CES, 2006). Cependant, parce qu'elle consiste à combiner une motorisation thermique et une motorisation électrique, la technologie hybride est encore chère : en France, la Prius est commercialisée entre 25 000 et 29 000€. La diffusion des véhicules hybrides reste aujourd'hui limitée. Toyota a commercialisé 385 000 Prius dans le monde depuis son lancement en 1997. Fin juillet 2005, il y en avait moins de 2 000 en France et de 19 000 en Europe. Honda a commercialisé 100 000 hybrides depuis six ans. Le marché évolue cependant rapidement. Entre 2003 et 2004, le marché a doublé : 166 000 hybrides ont été vendus en 2004 dont 78% par Toyota et 17% par Honda (Parlement, 2005).

Au total, encore marginale dans la rue, la technologie hybride n'est déjà plus ignorée par aucun constructeur dans la mesure où elle offre l'avantage de pouvoir s'insérer parfaitement dans les circuits de fabrication et de distribution des véhicules et d'être couplée avec l'ensemble des améliorations portant sur les moteurs thermiques. La montée de la concurrence dans ce secteur devrait rapidement faire baisser le prix d'achat, lequel devrait faire l'objet d'un amortissement accéléré dans un contexte de hausse continue du

prix du pétrole. Les ventes devraient progresser fortement mais de manière contrastée selon les marchés. Aux États-Unis et au Japon où le diesel est peu présent, la progression devrait être très forte. En revanche, en Europe, l'hybride devrait progresser plus lentement en raison des performances actuelles des moteurs diesel et de leur faible coût. Le succès à venir de cette filière sera également fortement lié à l'amélioration des performances des batteries, celle-ci étant essentielle pour parvenir à une hybridation plus complète¹. Plusieurs observateurs estiment d'ailleurs que la convergence de la filière hybride et de la filière tout électrique permettrait de résoudre de façon décisive les limites que rencontre chacune d'elles. Le principe d'un véhicule offrant la possibilité de rouler exclusivement à l'électricité dans le cadre des déplacements urbains quotidiens tout en permettant de recourir à la motorisation thermique classique sur de plus grandes distances constitue en effet une perspective hautement prometteuse (cf. point sur la voiture électrique).

⇒ *L'amélioration des autres paramètres de la consommation d'énergie des véhicules*

La réduction des consommations intrinsèques des véhicules routiers peut être obtenue non seulement par une amélioration des performances des motorisations, mais également de la modification de différentes caractéristiques du véhicule que sont principalement la masse, l'aérodynamique ou encore l'isolation thermique (CES, 2006 ; Parlement, 2005).

¹ Si les batteries actuelles nickel-métal hydrure (Ni-MH) offrent beaucoup de puissance, elles ne permettent pas une grande autonomie. Une étape supplémentaire devra donc être franchie vers plus de performance et un moindre coût grâce à l'utilisation de batteries lithium-ion (Li-ion) produites à grande échelle (Parlement, 2005).

Comme il n'est pas envisageable de revenir en arrière sur tous les acquis réalisés en termes de sécurité, d'habitabilité et de confort – qui jusqu'ici ont alourdi les véhicules – la réduction du poids des automobiles passe par des calculs de structure encore plus élaborés et par l'utilisation de matériaux légers. La puissance de calcul désormais disponible au moment de la conception permet de ne mettre que la quantité de matière nécessaire à l'endroit voulu pour garantir la résistance avec le poids minimum. Les tôles à très haute limite élastique permettent également de diminuer les épaisseurs tout en conservant la rigidité. Les matériaux légers comme les alliages d'aluminium sont de plus en plus utilisés.

Le travail sur l'aérodynamique est également un gisement de progrès : l'affleurement des vitres, l'ancrage des rétroviseurs sont autant de détails qui permettent d'influer sur le coefficient de pénétration dans l'air. Cependant, les véhicules à assise haute (4x4, monospace...) qui connaissent actuellement un fort succès commercial y compris en milieu urbain ont un profil qui ne permet pas d'obtenir un (Cx) coefficient de pénétration dans l'air très performant.

L'isolation thermique des véhicules est un autre grand défi partout où les systèmes de climatisation se sont développés, en raison de l'impact de ces dispositifs sur la consommation. De nombreux travaux sont menés sur ce sujet, dont les avancées sont progressivement introduites sur le marché. Des chercheurs californiens de Berkeley ont réussi à réduire de 75% le besoin de refroidissement et de 85% le besoin de réchauffement d'une voiture Ford Taurus par l'utilisation de systèmes d'isolation : des isolants en aluminium avec des cellules vides en nids d'abeille emprisonnant de l'air pour la partie

métallique de l'habitacle du véhicule ; un double vitrage de polycarbonate ou d'acrylique revêtu à l'intérieur d'un revêtement limitant l'impact du rayonnement solaire.

⇒ *La question spécifique de la motorisation des avions*

Le transport aérien est une composante singulière du système de transport dans la mesure où il est sans concurrence pour le transport de passagers sur longue distance et où il connaît les croissances de trafic les plus marquées. Résultat de la mondialisation de l'économie et de l'essor du tourisme international, le trafic aérien s'élève aujourd'hui à 1,8 milliard de passagers par an dans le monde avec une croissance annuelle de 5%. Il assure également 40% de l'échange international de marchandises et ce trafic croît lui aussi régulièrement. Cette augmentation du trafic provoque des hausses de consommation collatérales dues à l'encombrement des espaces aériens au-dessus des aéroports (Parlement 2006). La France n'est pas en reste face à ces tendances puisque, sur la période 1990-2002, le trafic aérien avec l'étranger s'est accru de 109% et les émissions de CO₂ liées de 58,5% (CGPC, 2005). La croissance du trafic aérien métropolitain entre 1990 et 2005 est en revanche beaucoup plus modeste (+13%) : après s'être nettement accru durant les années 1990, le trafic aérien métropolitain a en effet sensiblement reculé (-18%) depuis 2000 sous l'effet de la concurrence du TGV (Ministère de l'équipement, 2006).

Face à la forte progression de leur trafic à l'international et à la dépendance complète des moteurs d'avion vis à vis des hydrocarbures (kérosène), les compagnies aériennes française sont conduites à rechercher des moyens pour

maîtriser leur consommation d'énergie. Air France s'est par exemple fixé comme objectif de limiter le taux de croissance de ses émissions de CO₂ à la moitié de celui du trafic : par exemple, 2% pour les émissions pour une croissance de 4% du trafic (CGPC, 2005).

Pour remplir ce type d'objectif, deux voies principales sont envisagées :

- L'optimisation de la consommation :

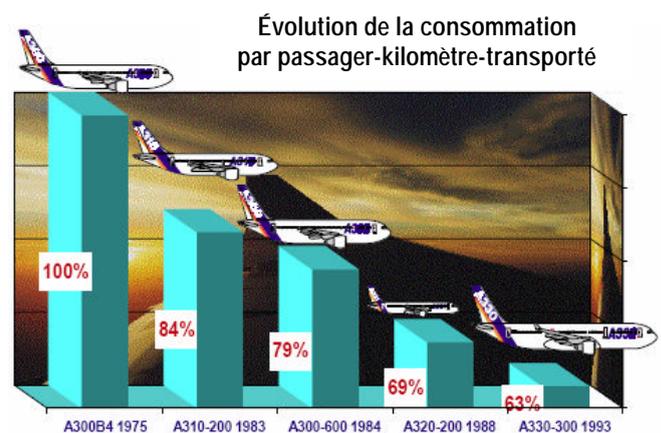
Elle passe tout d'abord par des mesures de limitation de la masse embarquée : limitation de la quantité de kérosène embarqué par multiplication des pleins dans les aéroports d'escale et ajustement à la masse réellement embarquée (procédure « Pleins partiels ») ; élimination progressive du double emport par la mise en place d'un catering¹ local dans les aéroports de destination et la limitation de la masse d'eau emportée ; utilisation de containers plus légers... L'optimisation de la consommation renvoie également à l'amélioration de l'entretien des moteurs et de la carlingue : réglages, nettoyages...

- Le renouvellement des flottes par des appareils moins consommateurs :

La composition de la flotte a un impact direct sur la part des dépenses de kérosène dans les charges totales : elle est de 10% pour les compagnies exploitant des appareils de nouvelle génération mais de 30% pour des compagnies exploitant des appareils plus anciens. Or, actuellement, si 39,5% de la flotte est constituée d'appareils de nouvelle génération (de conception postérieure à 1980), 40,5% sont de « mid-generation » (appareils

des années 70) et 20% d'ancienne génération. L'importance des appareils de mi-génération et d'ancienne génération est surtout significative en Amérique du Nord (70%), en Afrique (72%) et en Asie (52%) mais relativement faible en Europe (48%) surtout pour les avions d'ancienne génération (7%).

L'intérêt du renouvellement des flottes aériennes traduit le fait que les progrès de l'avionique dans le domaine des réacteurs (chambres de combustion) comme dans celui de la conception générale des avions (introduction de matériaux composites, réduction du poids du mobilier...) ont permis de réduire de près 40% la consommation de carburant par passager-kilomètre-transporté en moins de 20 ans (CGPC, 2005).



Le secteur des transports : développer les modes de transports de passagers et de marchandises alternatifs à la route

Un autre moyen de réduire la consommation d'énergie dans le secteur des transports consiste à opérer un report modal vers les moyens de transports les plus économes : les transports ferrés et fluviaux et les modes doux (vélo, marche à pieds). Si ce type d'évolution a déjà lieu pour ce qui concerne les transports intérieurs à longue distance de passagers – le trafic TGV (172 200 voyageurs-

¹ Le catering recouvre l'ensemble des activités liées aux services à bord, et notamment la restauration.

km/tep) domine désormais nettement celui de l'avion (18 200 voyageurs-km/tep) pour les trajets de moins de trois heures¹ – elle est en revanche loin d'être engagée en matière de transports urbains de voyageurs et de transports à longue distance de marchandises. En effet, les investissements nécessaires au développement d'une offre alternative à la route pour ces deux types de transport ne peuvent suffire en tant que tel. Le report effectif suppose que la demande soit au rendez-vous. Or, plusieurs facteurs contribuent à la croissance de la demande de transports routiers en France, pour les personnes comme pour les marchandises (P.Radanne, 2005) : l'essor des temps de loisirs, un fonctionnement en flux tendus de l'économie mondialisée, la concentration de l'emploi de service dans les agglomérations urbaines alors que l'habitat se desserre avec la périurbanisation. La mise en œuvre de mesures visant à infléchir certaines de ces tendances paraît donc indispensable.

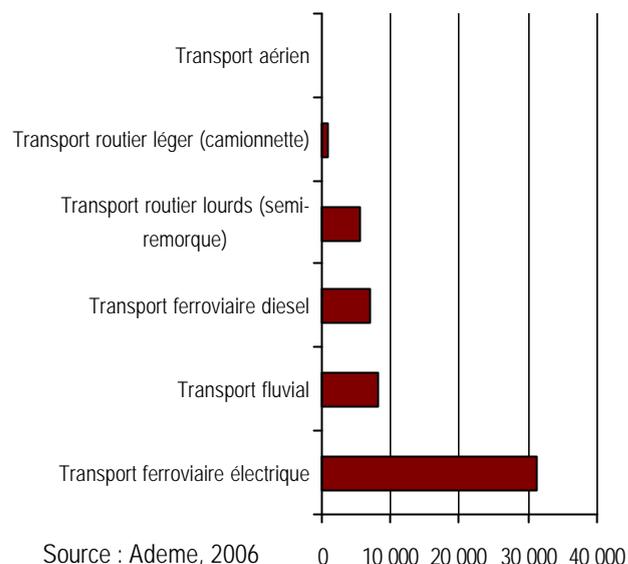
⇒ *Renforcer le recours au fret ferroviaire pour le transport de marchandises à longue distance*

Le chemin de fer électrique apparaît clairement comme le mode le plus efficace pour le transport de marchandises : une tonne-équivalent-pétrole lui permet de transporter plus de 30 000 tonnes-km², contre 6 000 tonnes-kms dans le cas du transport routier lourd et seulement 250 tonnes-kms pour l'avion (F.Moisan, 2006).

¹ Le train représente 86% de parts de marché pour des parcours en TGV de l'ordre de 2h (cas du Paris-Lyon/Nantes), 65% pour des parcours de 3h (Paris-Marseille/Bordeaux/Londres) et 45% pour des parcours de 4h (E.Barci, A.Bernusset, N.Coulombel, 2004)

² Unité de mesure correspondant au transport d'une tonne sur une distance d'un kilomètre.

Efficacité énergétique des différents modes de transports interurbains de marchandises en France en 2000 (en tonne-km/tep)



Dès lors, il paraît séduisant de promouvoir un important report modal des transports routiers vers les transports ferroviaires. Il s'agirait ainsi d'infléchir la tendance actuelle qui, à l'inverse de ce que l'on peut observer à l'échelle européenne, voit la réduction constante de la part de marché du ferroviaire sur le marché du transport de marchandises : celle-ci est passée de 23,5% en 1985 à 13% en 2005 (Ministère de l'équipement, 2006). Cette volonté de report se heurte cependant à une limite incontournable (Parlement, 2006) : le croisement des courbes de coût des transports de marchandises par rail et par route s'opère au bénéfice du rail que pour les distances supérieures à 500 kilomètres³, alors que les trois quarts du trafic européen de marchandises s'effectuent sur des trajets de moins de 200 kilomètres (95% en France). Seule la possibilité de franchissement d'obstacles naturels permet d'accroître l'intérêt du ferroviaire sur de plus courtes distances. Malgré

³ Il faut cependant anticiper le fait que, au fur et à mesure que les prix du pétrole augmenteront, le point d'équilibre entre les deux modes de transport sera plus bas (Parlement, 2006).

tout, l'objectif d'un report modal accru sur longue distance conserve un intérêt important en France. Notre pays, plus que tout autre en Europe, est confronté : d'une part, à un transit routier international qui, outre les nuisances qu'il engendre, ne produit aucune richesse et ne couvre que partiellement ses coûts d'usage des infrastructures ; d'autre part, à l'obligation d'assurer une desserte sans faille de ses ports maritimes à laquelle le transport routier ne pourra répondre seul (CES, 2006).

Dans ce cadre, il s'agit d'optimiser l'articulation entre transports ferroviaires à longue distance et desserte régionale et locale par la route. C'est l'objet de la notion d'intermodalité, ou transport combiné, qui associe les avantages de massification des modes de transport lourds aux avantages de souplesse et de capillarité du transport routier en recourant à des unités de chargement homogène¹ (CES, 2006).

En termes d'infrastructures, le développement du transport intermodal implique en premier lieu de raisonner à la bonne échelle, c'est à dire à l'échelle européenne. En effet, indépendamment du réseau de base constitué des trois axes majeurs nationaux que sont le Lille-Paris-Lyon-Marseille, le Lille-Paris-Bordeaux-Hendaye et le Lille-Paris-Toulouse-Perpignan sur lesquels le Fret SNCF s'est concentré dans le cadre de son plan de retour à l'équilibre financier 2004-2006, seul le marché européen paraît à même d'assurer la meilleure intensité d'utilisation du capital ferroviaire et le meilleur coefficient de remplissage du transport combiné (CES, 2006). Cette approche européenne suppose tout d'abord de répondre à l'enjeu de

l'unification des réseaux à l'échelle européenne : du fait de l'existence de trois largeurs de rail, de cinq systèmes électriques et de vingt systèmes de signalisation différents, la vitesse d'un transport ferroviaire de marchandises entre la Pologne et l'Espagne évolue entre 20 et 30 km/h (Parlement, 2006). Au delà, il paraît essentiel que l'Union européenne prenne la responsabilité de la mise en œuvre d'un programme d'équipement d'ampleur dans ce domaine, en créant deux axes de ferroutage à grande distance, sur le trafic Est-Ouest et le trafic Nord-Sud (Parlement, 2006).

Située au cœur de ces axes d'échanges, la France est appelée à prendre des initiatives fortes à ce sujet. L'Etat a ainsi annoncé en novembre 2005 plusieurs mesures visant à développer l'offre de transport combiné rail/route :

- la SNCF devrait recevoir un soutien à hauteur de 800 millions d'euros au total pour améliorer les performances du fret ferroviaire, qui fait l'objet jusqu'à présent de nombreuses critiques en ce qui concerne son manque de ponctualité et de flexibilité ;
- une autoroute ferroviaire de plus de mille kilomètres, entre Luxembourg et Perpignan, devrait ouvrir en mars 2007 ;

Au total, la question du développement du transport combiné rail/route conduit à poser celle de la répartition des crédits entre les projets d'infrastructures autoroutières et ceux concernant par exemple les contournements ferroviaires des agglomérations de Paris, Lyon, Dijon, Nîmes, Bordeaux ou Toulouse. A cet égard, la mission sur l'effet de serre de l'Assemblée nationale (2006) préconise de juger les projets en prêtant une attention accrue à leurs effets en termes d'émissions de CO₂. En ce sens, elle recommande

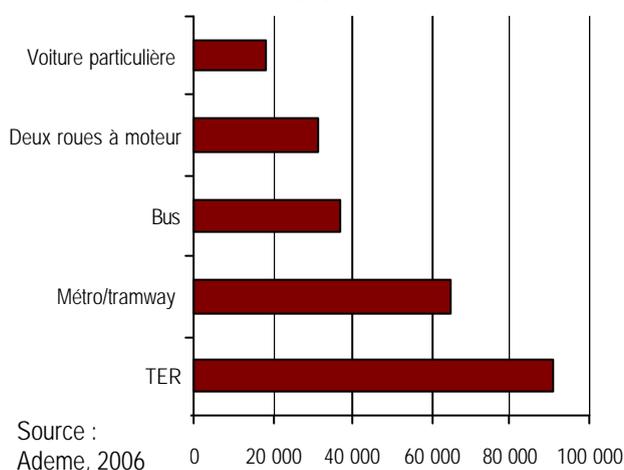
¹ Un conteneur maritime, une caisse mobile terrestre, voire une remorque ou semi-remorque accompagnée ou non de son véhicule moteur.

de ne pas donner suite aux projets de doublement des autoroutes nord-sud.

⇒ *Accroître la part modale des transports en commun dans les aires urbaines*

Le chemin de fer électrique est également le mode le plus efficace pour le transport de marchandises : une tonne-équivalent-pétrole lui permet de transporter plus de 90 000 voyageurs-kms¹, contre 18 000 voyageurs-kms dans le cas de la voiture particulière (Ademe, 2006).

Efficacité énergétique des différents modes de transports urbains de voyageurs en France en 2000 (en voyageur-km/tep)



L'intégration des Transport Express Régionaux (TER) dans la problématique des transports urbains se justifie, d'une part, par le fait qu'ils desservent souvent plusieurs points d'une même agglomération (cet aspect n'est pas réservé à la région parisienne), et d'autre part, par le rôle essentiel qu'ils jouent dans la formation des métropoles multipolaires que l'on observe aujourd'hui (FNAU, 2006). Autrement dit, si l'on estime que les territoires urbains comprennent aujourd'hui, non seulement les agglomérations et l'espace périurbain qui les entourent, mais également les polarités secondaires qui se trouvent dans leur aire

¹ Unité de mesure qui équivaut au transport d'un voyageur sur une distance d'un kilomètre.

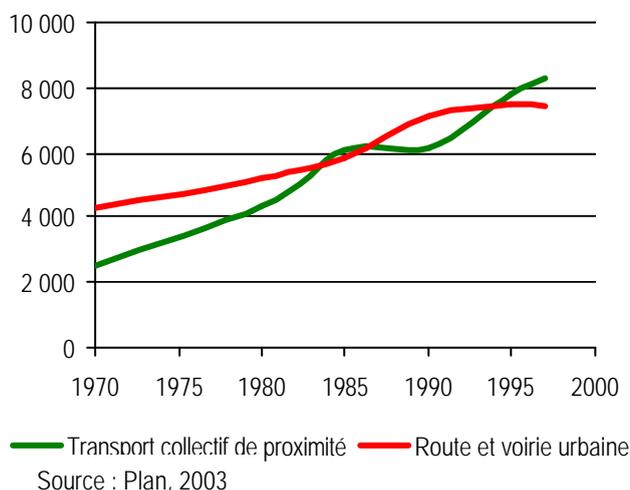
d'influence, les TER tiennent effectivement une place importante dans la mise en réseau des différents pôles qui composent un bassin de vie. Dans ce cadre, il paraît cependant nécessaire de distinguer deux types d'enjeux en terme de report modal : la substitution du train à la voiture pour les relations interpoles ; la substitution des transports en commun (métro, tramway, bus) à la voiture pour les déplacements internes aux agglomérations.

Le premier enjeu renvoie d'abord à une amélioration du rythme de desserte sur les tronçons métropolitains : Villefranche-sur-Saône/Vienne, Saint-Étienne/Bourgoin-Jallieu, en passant par Lyon, par exemple en région lyonnaise. Le projet « Réseau Express de l'Aire urbaine Lyonnaise » initié par le Conseil Régional Rhône-Alpes s'inscrit dans cette perspective. Lancé en septembre 2005, il vise à mettre en place le cadencement des services ferroviaires régionaux d'ici fin décembre 2007 et une tarification multimodale d'ici 2009. Il s'agit autrement dit de faire passer des trains tous les jours à la même heure, au même rythme, en assurant la correspondance avec les bus. Cette démarche semble d'autant plus prometteuse que les TER rencontrent un succès grandissant ; ils offrent en effet des performances souvent supérieures à l'automobile pour relier deux centres urbains. Depuis la régionalisation de leur gestion, les TER connaissent ainsi un trafic en forte croissance : +6,5% en moyenne à l'échelle de la France en 2005, +9% en Rhône-Alpes (Insee, 2006).

La substitution des transports en commun à la voiture, quant à elle, apparaît aujourd'hui comme plus problématique. La période récente montre en effet que la part des transports collectifs dans les déplacements urbains reste à un niveau

relativement modeste malgré les investissements lourds qui ont été effectués depuis les années 1990 (Plan, 2003). En 2002, notamment, 26 villes françaises ont réalisé ou décidé de réaliser la construction de transports collectifs en site propre (métro, tramways, tram-train, bus). On peut estimer que la répartition des crédits entre projets d'infrastructures routières et projets d'infrastructures de transport collectif ne fait pas encore l'objet d'une inflexion forte en faveur des seconds. L'impact des nouveaux investissements dans les transports en commun est en effet d'autant plus limité que l'offre en matière d'infrastructures routières continue de s'accroître. Ainsi, selon la Mission Interministérielle de l'Effet de Serre (2004), en l'état des politiques de transports routiers et d'urbanisme, un doublement de l'offre de transports publics ne permettrait de déplacer que 8% du trafic routier.

Evolution des dépenses des administrations publiques en transport entre 1970 et 1997 (en millions d'euros)



Ce constat reflète le fait que les trafics automobiles au sein des agglomérations conservent un important potentiel de croissance dans la mesure où ils sont continuellement alimentés par les flux en provenance des communes périurbaines. Autrement dit, si le renforcement de la part modale des transports en commun appelle, au delà de

l'extension de leur réseau, un traitement spécifique des trafics automobiles internes aux agglomérations selon des principes de préservation des espaces centraux – piétonisation des rues, mises en place de péages urbains, réduction de la taille des voiries, mise en place de parkings-relais en bout de réseau – il ne peut faire l'impasse de la question de la maîtrise en tant que telle des flux induits par la périurbanisation, laquelle suppose des politiques volontaristes en matière d'urbanisme (cf. point suivant sur l'urbanisme durable).

⇒ *Promouvoir les déplacements à vélo dans les agglomérations urbaines*

En modifiant durablement la forme de nos villes, en transformant les rues en routes, en allongeant les distances et en contribuant à la spécialisation des espaces, la voiture a produit un système qui a marginalisé les autres modes de déplacement, et notamment les modes dits doux (marche à pied, vélo).

Dans le contexte énergétique et environnemental actuel, il paraît incontournable de réhabiliter la place de la bicyclette dans le système de transport (B.Le Brethon, 2004). Sur les trajets courts inférieurs à 5 Km ou, combiné avec les transports collectifs, pour des trajets plus longs dans les grandes agglomérations ou inter villes, le vélo est souvent plus performant que la voiture (flexibilité, stationnement...). A titre individuel, la pratique quotidienne du vélo pendant une demi-heure permet d'améliorer sa santé : associée à une alimentation saine et diversifiée, celle-ci suffit à diminuer par deux le risque d'infarctus, de maladies coronariennes et de certains cancers. D'une manière générale, le vélo bénéficie dans notre pays d'un réel capital de sympathie entretenu par les grands rendez-vous sportifs. Enfin, la promotion des

déplacements à vélo peut constituer un volet essentiel des politiques en faveur de la mobilité des populations défavorisées.

Le rapport remis au 1^{er} ministre en 2004 par le Député B. Le Brethon propose un objectif de 10% des déplacements urbains effectués en vélo à l'horizon 2010. Pour atteindre cet objectif, ce rapport, ainsi que celui publié en 2003 par le Commissariat général du plan, suggèrent que soient mises en œuvre plusieurs mesures :

- Faire une place plus large au vélo sur l'espace public en encourageant le développement des réseaux de pistes cyclables (étendue, continuité, cohérence, sécurité) et des zones 30 en villes.
- Renforcer l'offre de stationnement pour les vélos, sur l'espace public (Etablissements d'enseignement, zones commerciales...) mais également dans les immeubles collectifs.
- Développer l'intermodalité « vélo + transports en commun », notamment dans les zones périurbaines, en fixant des normes de stationnement vélo dans les gares et stations de transports collectifs et offrant la possibilité d'emmener son vélo sur les réseaux eux-mêmes.
- Impulser la réalisation des Plans de déplacements d'entreprise et la prise en compte du vélo dans ces plans.

Plus largement, le succès des politiques en faveur des déplacements à vélo repose sur la mise en cohérence des politiques de déplacements et avec celles concernant le logement, les zones d'activités et de commerces. Parce qu'elle peut permettre d'anticiper l'usage du vélo dans la desserte des nouveaux espaces urbanisés, cette mise en cohérence paraît incontournable pour parvenir à un

report modal massif au profit de la bicyclette. La recherche de cette cohérence est au fondement de ce que l'on peut appeler « urbanisme durable ».

⇒ *Un impératif pour garantir la modification de la répartition modale dans les territoires urbains : l'urbanisme durable*

Les orientations évoquées précédemment en matière de report modal dans les agglomérations urbaines peuvent être facilitées par certains éléments de contexte qui jouent cette fois-ci en faveur de la modération de la croissance du trafic (P. Radanne, 2005) : renchérissement du prix du pétrole, congestion urbaine accrue, budget-temps des individus qui n'est pas illimité, réduction des déplacements pour démarches administratives et achats avec le développement d'Internet. Mais, les véritables facteurs qui peuvent être à l'origine d'un report modal massif vers les transports les plus économes, donc les moins émissifs de CO₂, concernent plus sûrement les fondements structurels de la demande de déplacements urbains, c'est à dire l'évolution de la distance moyenne entre les lieux d'habitation et les lieux d'emplois, de commerces et de services.

La diffusion de l'automobilité au sein des ménages – entre 1950 et 2000, le nombre de voitures particulières en circulation en France a été multiplié par plus de dix et il est passé de 274 pour 1000 français en 1973 à 486 en 2002 (CAS, 2006) – et l'extension constante des réseaux routiers – la longueur totale du réseau routier du pays s'élève aujourd'hui à 610 000 km, dont 25 000 km de routes nationales et 11 000 km d'autoroutes (Ministère de l'équipement, 2006) – ont offerts des possibilités de déplacements toujours accrues. Conjuguées avec l'évolution des modes de vie des Français (individualisation des trajectoires de vie, essor du

temps libre...), ces deux processus se sont traduits par un desserrement important de l'habitat depuis une quarantaine d'années.

Jusqu'à dans les années 1990, la classification élaborée par l'Insee pour décrire les territoires urbains distinguait les espaces urbains des espaces ruraux exclusivement sous l'angle de la concentration spatiale de populations sédentaires (B.Chabanel, 2004) : la commune concernée répond-elle aux critères définissant la notion d'« unité urbaine »¹ ? Cette approche permet de rendre compte de l'urbanisation de la population française : entre 1936 et 1999, la population des unités urbaines a doublé, passant de 22 millions d'habitants à 44 millions, soit une augmentation de 100% alors que la population française métropolitaine n'augmentait que de 40%. La part de la population urbaine dans la population totale est donc passée de 52,9% en 1936 à 75,5% en 1999. Mais, deux éléments viennent nuancer ces observations. D'une part, le doublement de la population urbaine relevé entre 1936 et 1999 s'est fait au prix de la multiplication par plus de 2,7 de la superficie des territoires urbains qui passe de 36 000 à 100 000 km². D'autre part, la croissance de la population urbaine s'est très nettement ralentie sur la période 1968-1982, en raison certes du tarissement du phénomène de l'exode rural, mais aussi, et de plus en plus fortement, du fait de la

¹ Concrètement, selon les normes recommandées au niveau international, sont qualifiées d'urbaines toutes portions d'espace agglomérant au moins 2 000 habitants et dans un cadre bâti dont les composantes ne doivent être séparées de plus de 200 mètres. En France, l'Insee désigne par les termes d'« unité urbaine » chacune de ces agglomérations de population au sein d'un espace bâti resserré : l'unité urbaine est une commune ou un ensemble de communes qui comporte sur son territoire une zone bâtie d'au moins 2 000 habitants où aucune habitation n'est séparée de la plus proche de plus de 200 mètres.

périurbanisation qui se traduit, depuis le recensement de 1975, par un solde migratoire négatif pour les communes urbaines.

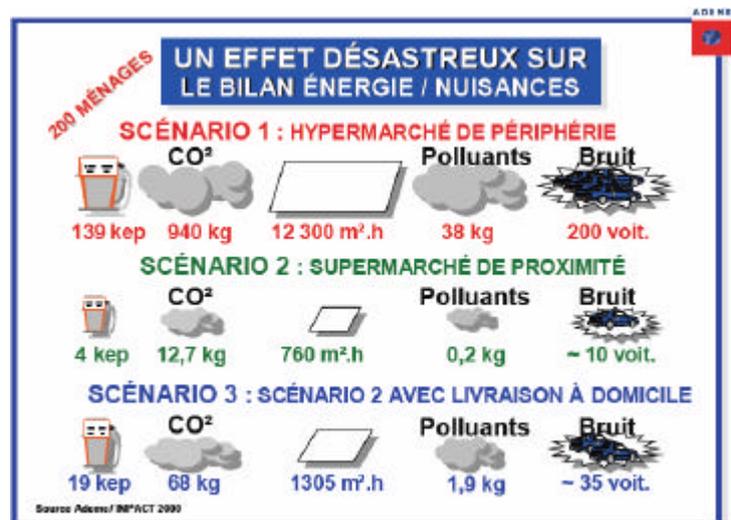
Pour prendre la mesure de ce processus de périurbanisation, l'Insee a mis au point une nouvelle classification des territoires urbains en 1997 s'appuyant sur l'hypothèse que la périurbanisation est d'abord et avant tout le reflet de stratégies de migration résidentielle dissociant de façon croissante la commune-lieu de résidence et la commune-lieu d'emploi. Cette hypothèse est confirmée par le fait que, en 1999, 61% des actifs travaillent hors de leur commune de résidence alors qu'ils n'étaient que 52% en 1990. Dans cette perspective, la nouvelle classification permet de délimiter des aires urbaines au sein desquelles il faut distinguer le pôle urbain – constitué d'une unité urbaine offrant au moins 5 000 emplois et dont les actifs travaillent à plus de 30% en son sein – de la couronne des communes dites périurbaines – dénombrées selon le principe en vertu duquel 40% au moins de leur population active occupée travaillent dans le pôle ou dans des communes attirées par celui-ci. Cette classification permet de mettre en évidence le double phénomène suivant (B.Chabanel, 2004) : une concentration accrue de l'emploi dans les pôles urbains (62% en 1962 contre 72% en 1999) ; un desserrement continu de la population active vers les communes périurbaines (10,5% en 1962 contre 15,5% en 1999).

Au final, cette dispersion de la population dans les communes sous influence urbaines conduit à un accroissement très net de la distance moyenne des déplacements entre le domicile et le lieu de travail, lequel participe largement à la croissance de la

distance totale parcourue quotidiennement¹ : en moyenne, les Français parcouraient 35,5 km par jour en 1994, au lieu de 16,3 en 1973 (CGPC, 2006). Cet allongement des distances parcourues alimente directement la demande d'automobilité dans la mesure où les réseaux de transports en commun ne peuvent qu'imparfaitement desservir la population dispersée des communes périurbaines, à l'exception notable de celles qui possèdent une desserte ferroviaire. Par ailleurs, il est important de noter que, grâce à l'extension constante des réseaux routiers, cette croissance de la distance parcourues quotidiennement se fait à budget-temps constant : au fils des enquêtes portant sur les comportements de déplacement, on observe que le temps consacré chaque jour aux déplacements par chaque individu se maintient dans une moyenne d'une heure.

Une approche plus concrète des conséquences de l'étalement sur l'évolution des émissions de CO2 issues des transports est offerte par les travaux de l'Ademe (2006) portant sur les différentes possibilités d'approvisionnement commercial qui s'offrent aux ménages des aires urbaines. Trois scénarii ont été étudiés : le premier est celui de l'approvisionnement traditionnel auprès des commerces de proximité des zones denses des villes (ravitaillés par camions et auxquels l'on se rend à pieds) ; le second scénario est emblématique de l'urbanisme conçu pour l'automobile puisqu'il correspond à la fréquentation des hypermarchés de périphérie d'agglomération

(ravitaillés par camions et auxquels l'on se rend en voiture) ; le troisième scénario est plus émergeant dans la mesure où il répond au développement des achats sur Internet dont la livraison à domicile est le pendant (celle-ci s'effectue par l'intermédiaire de camionnettes). La comparaison de ces trois scénarii sur le plan des émissions de CO2 est significative. L'approvisionnement des hypermarchés, puis l'utilisation de la voiture particulière afin que les ménages de banlieue puissent effectuer leurs courses hebdomadaires, génèrent des émissions polluantes, une consommation d'espace et une pollution sonore sans commune mesure avec la situation d'un approvisionnement dans un supermarché de proximité, où de petites courses (6



¹ On sait qu'une part importante de la croissance de la distance moyenne parcourue quotidiennement est liée également à l'accroissement du temps libre et du nombre de retraités. Autrement dit, à côté de l'éloignement des lieux d'habitat et des lieux d'emplois, il faut aussi tenir compte de la croissance forte des déplacements de loisirs et de tourisme (CGPC, 2006).

kg) sont effectuées régulièrement par les ménages. Le scénario 3 est un scénario intermédiaire qui se révèle tout de même beaucoup plus efficace que le scénario 1.

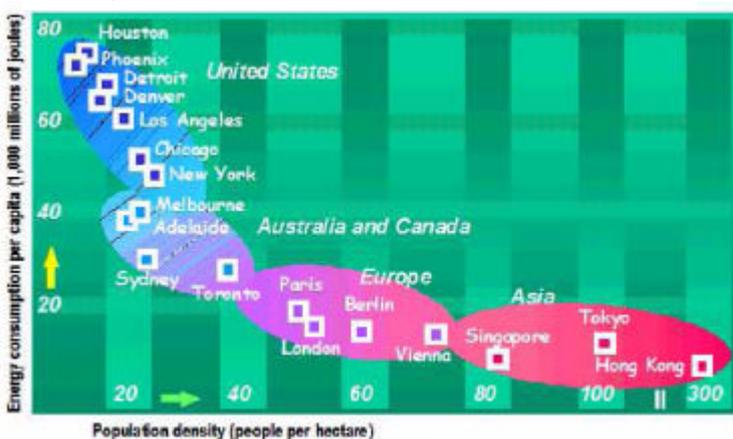
Ces différentes analyses conduisent au constat plus général selon lequel la densité, plus ou moins élevée, de l'urbanisation aurait un effet direct sur la consommation d'énergie et donc le niveau d'émissions de CO2 des territoires considérés. Un rapport récent du Centre d'Analyse Stratégique (2006) rappelle ainsi les résultats d'une étude confrontant, pour différentes métropoles mondiales, densité de population et niveau de consommation d'énergie par personne : d'une manière générale, plus la densité d'une ville est élevée et plus sa consommation d'énergie par habitant est faible. Dans ce cadre, la maîtrise de la demande à venir de déplacements – en terme de distance puisque le nombre de déplacements reste stable dans la durée – ainsi que sa prise en charge par les modes les plus économes d'énergie impliquent à l'évidence une stratégie volontariste de réorganisation de la répartition spatiale des activités (emplois, logements, services, commerces, loisirs).

Trois grands principes d'urbanismes sont aujourd'hui consolidés pour répondre à cet enjeu (Agence d'urbanisme de Lyon, Grand Lyon, 2005).

- La mixité des fonctions : l'une des raisons essentielles de l'accroissement des distances parcourues réside dans la spécialisation fonctionnelle des nouveaux espaces urbanisés, à la différence de la ville historique. Zones pavillonnaires, zones commerciales, zones industrielles, pôles des services ne se recoupent rarement. Les nouveaux espaces urbanisés devraient répondre désormais à ce critère de mixité des fonctions afin de promouvoir les déplacements courts par des modes collectifs ou doux (vélo, marche).

- La densification des tissus urbains : la question de la densité renvoie à une vision de ville qui serait à nouveau celle des courtes distances spatiales et non plus seulement temporelles. Cette vision évoque plus ou moins consciemment une époque où la ville fonctionnait sans l'automobile : c'est parce qu'elle devait sans cesse se refaire sur elle-même (pour maintenir la possibilité d'atteindre les différentes fonctions urbaines à pieds) que la ville historique possède l'attrait patrimonial qu'on lui reconnaît aujourd'hui. Autrement dit, comme le décrit David Mangin (2005), les centres urbains et leur faubourg sont le fruit d'un processus historique de sédimentation non planifié des différentes étapes du développement urbain, sédimentation qui produit une « épaisseur temporelle » dont raffolent les amoureux des villes. Dès lors, il serait possible de trouver une nouvelle convergence entre attrait de la ville et densification maîtrisée des tissus urbains.

Rapport entre densité de population et consommation d'énergie par habitant dans plusieurs métropoles mondiales



Source : CAS, 2006

Infléchir le mouvement de périurbanisation passerait ainsi par un travail de mise en valeur des territoires urbains existant, et en premier lieu des zones d'urbanisation prioritaires aménagées durant les années 1960 et 1970. David Mangin plaide pour des stratégies de densification progressive s'appuyant sur la capacité de mutabilité des tissus urbains. Selon lui, cette démarche passe par le « re-maillage » de ces derniers selon un schéma plus fin, réhabilitant la notion de rue piétonne.

- Réseaux et polarités comme armature urbaine :

Pour beaucoup d'observateurs, l'effort de mixité et de densité doit s'organiser à partir des réseaux de transports en commun. L'urbanisation devrait prioritairement s'établir autour des points de desserte existants (stations de métro et tramway, gares SNCF). Au delà, il paraît désormais incontournable d'assortir les zones d'extension urbaine d'une desserte systématique en transports en commun.

Deuxième levier technologique : développer les filières énergétiques faiblement émettrices de dioxyde de carbone

Répondre à la croissance de la demande de transport tout en favorisant le recul du recours aux énergies fossiles suppose de développer fortement le recours aux modes de transports faiblement émetteurs de CO₂. Cet impératif renvoie tout d'abord à la mise au point et à la diffusion de carburants et de motorisations alternatifs aux véhicules routiers conventionnels. Il induit également un report modal des trafics de la route

vers les réseaux de transports ferroviaires et urbains.

Les filières décrites ci-après ne sont pas toutes au point, certaines nécessitant des recherches amont ou des investissements d'infrastructures de grande ampleur qui repoussent le moment de leur disponibilité : voiture électrique ; pile à combustible ; production, transport et stockage de l'hydrogène ; accroissement de l'offre de transports ferroviaires et collectifs. A court terme, seule la production de biocarburants apparaît comme une technologie susceptible d'un essor accéléré (Ministère délégué à la recherche, 2004).

Le secteur des transports : développer les alternatives aux hydrocarbures et aux moteurs à explosion

Secteur d'activité le plus émetteur de CO₂, le secteur des transports est aussi celui au sein duquel se posent les plus grandes difficultés de substitution de nouvelles énergies aux combustibles fossiles. Pour autant, plusieurs voies, plus ou moins avancées, existent pour constituer une offre de carburants et/ou de motorisation alternatives.

⇒ *Les carburants moins carbonés issus de combustibles fossiles*

Aujourd'hui, deux formes de carburants gazeux issus du pétrole ou du gaz naturel sont disponibles sur le marché : le Gaz Naturel pour Véhicules (GNV) et le Gaz de pétrole Liquéfié (GPL).

Pour ce qui concerne le GPL, son intérêt en matière d'émissions de CO₂ s'est peu à peu estompé compte tenu des progrès de la dépollution des émissions issues des carburants classiques, du manque d'investissement des constructeurs dans l'optimisation des motorisations et de l'absence de voitures mono-carburant. En France, après avoir

connu un essor important à partir de 1995, le GPL connaît un déclin depuis 2000 à la suite de plusieurs accidents (explosion de réservoirs de véhicules). On observe ainsi un reflux des ventes de voitures neuves en bicarburant et simultanément celle du nombre des points de vente, tandis que la production de GPL carburant est passée de 250 000 à 150 000 tonnes entre 2000 et 2004. Aujourd'hui, seulement 180 000 véhicules roulent au GPL en France, grâce à l'approvisionnement de 2 000 stations services.

En raison d'un bilan CO₂ plus favorable, la filière GNV semble avoir en revanche le vent en poupe à l'heure actuelle. Outre l'objectif d'une contribution de 20% à la consommation énergétique des transports en 2020 fixé par la Commission européenne, la filière GNV fait l'objet d'une attention croissante en France où elle n'émerge véritablement qu'en 1998 à la suite d'un premier accord (incitation fiscale sur le carburant, aide financière à l'achat d'un véhicule GNV...) entre les pouvoirs publics et les acteurs concernés (IFP, 2006). Après un second protocole portant sur la période 1999-2005, le parc GNV compte 1 600 autobus et 300 véhicules de service urbains (bennes à ordures notamment) et 5500 véhicules légers et véhicules utilitaires légers (Parlement, 2005). Signé le 4 juillet 2005, un troisième protocole entre l'État et la filière GNV fixe de nouveaux objectifs à l'horizon 2010 : un parc total de 100 000 véhicules ; doublement du parc de bus au GNV et quadruplement du celui de véhicules lourds ; multiplication des stations services pour développer le marché des véhicules individuels... Au total, la contribution du GNV à l'objectif de réduction des émissions de CO₂ devrait rester modeste en raison du faible nombre de modèles de véhicules proposés

et de stations services (300 stations GNV en 2010 contre 2000 stations GPL actuellement), et de la faible rentabilité d'une filière qui ne propose pas d'alternative véritable aux filières automobile classique (Parlement, 2005).

⇒ *Les biocarburants*

La production des biocarburants sollicite une énergie renouvelable, la biomasse. Celle-ci désigne la masse totale de l'ensemble des êtres vivants sur terre, considérée du point de vue de l'énergie que l'on peut en obtenir. Plus précisément, les biocarburants sont produits à partir de cultures dédiées à leur fabrication. Actuellement, deux grandes catégories de biocarburants sont mises en œuvre, l'une destinée aux moteurs essence et l'autre aux moteurs diesel (Parlement, 2006 et 2005) :

- L'éthanol : biocarburant le plus produit et le plus utilisé dans le monde, il est issu de la fermentation de sucres (betteraves, cannes à sucre) ou d'amidon (amylacées : blé, maïs) puis de la distillation pour séparer l'alcool de l'eau. Il peut être utilisé par incorporation directe dans l'essence, avec un taux de substitution qui peut atteindre 85%¹, sous réserve d'une adaptation des carburateurs et des moteurs². L'éthanol peut aussi être employé sous forme d'ETBE (éthyl tertio butyl éther), composé oxygéné issu de la réaction en quantités presque égales d'éthanol et d'isobutène, co-produit d'origine pétrolière. Ce

¹ Dans l'Union européenne, cette utilisation directe au-delà de 10% d'incorporation est car elle augmente la volatilité du produit

² L'éthanol peut être utilisé à des niveaux très élevés par les automobiles dans le cadre de véhicules dits « fuel flexible ». Grâce à un calculateur qui adapte la combustion au mélange et à des modifications du moteur, ces véhicules acceptent indifféremment de 0 à 85% d'éthanol (E 85).

deuxième produit a la préférence des pétroliers dans la mesure où il a l'avantage de parfaitement se mélanger à l'essence, de pouvoir y être incorporé à tout moment et d'être transporté avec elle sans précaution particulière.

- L'ester méthylique d'huiles végétales (EMHV) : produits à partir d'huiles végétales (de colza, de tournesol, de soja...), l'EMHV est incorporé au gazole. Cette incorporation est autorisée en France jusqu'à 30% pour les flottes captives et jusqu'à 100% en Allemagne avec des précautions particulières.

L'intérêt des biocarburants en matière environnementale réside dans le fait que les émissions de CO₂ issues de la combustion de la biomasse s'équilibrent avec l'absorption par photosynthèse réalisée par la plante durant sa croissance¹. Cet apport est cependant nettement réduit par la dépense d'énergie que nécessite le processus de transformation de la biomasse en carburant : les réductions d'émissions seraient de 60% pour l'éthanol et de 70% pour l'EMHV (Parlement, 2005). Les autres avantages des biocarburants résident dans le fait qu'ils se substituent partiellement à une ressource en voie de raréfaction et peuvent s'insérer sans trop de problèmes dans les circuits de production et de distribution de carburants (Parlement, 2006).

¹ Toutefois, lorsque l'on raisonne à partir de la ressource forestière, on constate que le nouvel arbre n'est pas en mesure d'absorber immédiatement le CO₂ rejeté par la combustion de son aîné dans la mesure où il faut compter une trentaine d'années pour qu'il parvienne à maturité ; dès lors, un équilibre strict suppose un volume de plantation supérieur à l'abattage (J.C.Lhomme, 2001). On peut également estimer sur ce plan qu'il y a une anticipation de la restitution du CO₂ qui aurait, de toute façon, été réémis dans l'atmosphère du fait de la décomposition des arbres (Parlement, 2006).

Le pouvoir calorifique des biocarburants est en revanche inférieur à celui des hydrocarbures : avec le même volume de carburant, un automobiliste pourra faire d'autant moins de kilomètres que le volume d'incorporation de biocarburants sera important (Parlement, 2005). Ainsi, 1,063 litre d'EMHV et 1,5 litre d'éthanol sont nécessaires pour produire la même énergie qu'un litre de gazole ou d'essence. Ces différences ne sont cependant sensibles qu'à partir de 25% d'incorporation (Minefi, 2005). Une autre limite renvoie au fait que, en l'état actuel des méthodes de production, les seuils économiques de rentabilité de la filière sont encore loin d'être atteints puisqu'ils se situent à 75\$-80\$ le baril pour les esters et entre 90\$ et 150\$ le baril pour l'éthanol, en incorporant à ce prix le coût des « bases essence » incorporées pour produire de l'ETBE.

A l'échelle mondiale, les Etats-Unis et le Brésil ont été les pionniers du renouveau de la production d'éthanol carburant – à partir du maïs pour les États-Unis et de la canne à sucre pour le Brésil – à la suite des chocs pétroliers des années 1970 (Parlement, 2005). Du fait de cette antériorité considérable par rapport à l'Europe, ces deux pays sont de loin les principaux producteurs d'éthanol à l'heure actuelle², s'appuyant notamment sur leur important marché intérieur. La situation est différente pour ce qui concerne l'EMHV dans la mesure où la motorisation diesel domine avec 60% de la consommation de carburant en Europe. L'Europe est très logiquement leader mondial sur le

² La production d'éthanol se répartit de la manière suivante : Brésil 62 %, États-Unis 43 %, reste du monde 5 %.

marché de l'EMHV dont elle assure 83% de la production¹.

En 2003, le développement des biocarburants en Europe a fait l'objet d'une directive de l'Union Européenne fixant comme objectif leur incorporation à hauteur de 5,75% dans les carburants automobiles en 2010. Le Gouvernement français a décidé, le 1^{er} septembre 2005, d'atteindre dès 2008 cet objectif et de porter le taux d'incorporation à 7% en 2010 et à 10% en 2015. On est cependant encore loin de la cible dans la mesure où, en 2005, seulement 500 000 tonnes de biocarburants (400 000 tonnes de biodiesel et 100 000 tonnes d'éthanol) ont été incorporées aux 40 millions de tonnes de carburants consommés dans les transports en France, soit l'équivalent 1% environ de l'ensemble de la consommation de carburant (Wikipedia, 2006).

En France, le développement de la filière des biocarburants passe aujourd'hui par la résolution du problème de la concurrence d'occupation des sols entre les usages agricoles et les usages non agricoles (dont les biocarburants, mais également la chimie verte). L'objectif d'incorporation des biocarburants à hauteur de 5,75% suppose en effet de cultiver 220 000 ha pour l'éthanol et 1 800 000 ha pour l'EMHV, soit 20% de la production de Betterave, 3% de la production de blé et 75% de la production d'oléagineux. Il s'agit d'aller bien au-delà de la seule utilisation des jachères qui représentent aujourd'hui 1 200 000 ha (Minefi, 2005). Au delà, la substitution complète des carburants fossiles par les biocarburants paraît illusoire : P.Radanne (2005) souligne que si la France consacrait un quart de sa

surface agricole utile² – laquelle est estimée à près de 30 millions d'hectares en 2004 (Ministère de l'écologie, 2006) – à la production de biocarburants, elle n'assurerait qu'un tiers des besoins actuels de carburants.

Plusieurs observateurs estiment que l'amélioration à venir des performances (quantités, coûts, réduction des émissions de CO₂) de la filière biocarburant passe par la mise au point de processus permettant d'utiliser l'ensemble de la plante au lieu de n'exploiter que la graine ou la racine comme actuellement. Ces procédés sont regroupés sous la dénomination anglo-saxonne de « biomass to liquid » (BTL). Deux voies sont aujourd'hui explorées (Ministère délégué à la recherche, 2005) :

- la voie thermo-chimique (ou voie sèche) : production de gaz de synthèse (CO+H₂) par gazéification de la biomasse ligno-cellulosique (bois, déchets de bois, paille,...). Cette première étape, qui arrivera à maturité industrielle vers 2015, peut être suivie au choix : de la production de carburants liquides directement substituables (gazole) par le procédé Fischer-Tropsch ; ou de la production d'hydrogène par le procédé de gaz-shift.

- la voie biochimique (ou voie humide) : production d'éthanol à partir de matières premières ligno-cellulosiques par le biais de procédés biochimiques (hydrolyse par des enzymes cellulolytiques et fermentation

¹ 44% pour l'Allemagne, 22% pour la France, 17% pour l'Italie.

² La surface agricole utile (SAU) est un concept statistique destiné à évaluer le territoire consacré à la production agricole. La SAU est composée de : terres arables (grande culture, cultures maraîchères, prairies artificielles...), surfaces toujours en herbe (prairies permanentes, alpages), cultures pérennes (vignes, vergers...). Elle n'inclut pas les bois et forêts mais comprend les surfaces en jachère (comprises dans les terres arables).

éthanolique par des souches de levures utilisant les pentoses) qui devrait arriver à maturité industrielle vers 2010.

⇒ *La voiture électrique : une voie prometteuse*

Reposant sur des principes établis dès le 19^{ème} siècle (batterie et générateur électriques), la voiture électrique représente une voie éminemment prometteuse en terme d'émissions de CO₂ puisque son utilisation en serait dépourvue ; à la condition toutefois que l'électricité injectée dans les batteries soit produite par les filières nucléaires, renouvelables ou thermiques à séquestration de CO₂. Outre l'absence d'émissions de CO₂, l'utilisation du véhicule électrique présente l'intérêt de générer de faibles coûts comparativement à celle des véhicules à moteur conventionnels : grâce au rendement énergétique élevé du moteur électrique (x 2 ou x 3 par rapport à celui du moteur thermique), la simple recharge sur secteur ferait ressortir un coût d'un euro les 100 km, d'un ordre de grandeur 10 fois inférieur au coût des carburants classiques à la pompe, en raison notamment du fait que l'électricité n'est pas soumise à la TIPP. Le moteur électrique constitue par ailleurs une technologie particulièrement fiable et silencieuse (Parlement, 2005).

Ces promesses n'ont trouvé pas jusqu'ici de débouché commercial. Deux raisons principales peuvent l'expliquer. La première est l'immaturité de la technologie. Que ce soit au tout début de l'aventure automobile ou au début des années 1990, les performances des voitures électriques s'avèrent trop faibles et leur coût trop élevé pour qu'elles apparaissent comme des concurrentes sérieuses. La seconde est la quasi-absence de marché pour les voitures mono usage. En effet,

l'autonomie des véhicules électriques est jusqu'à présent restée en deçà des 100 km, de telle sorte que la voiture électrique ne peut être qu'urbaine, répondant à la majeure partie des besoins quotidiens mais ne pouvant prendre en charge les déplacements de week-ends et les départs en vacances. En dehors d'un statut de « second » véhicule d'un foyer, la capacité de pénétration sur le marché de la voiture électrique demeure réduite (Parlement, 2005).

Des avancées techniques importantes dans plusieurs domaines seront nécessaires pour retourner la situation (Parlement, 2006) :

- L'autonomie : Les prototypes pré-industriels disponibles sur le marché commencent à atteindre une autonomie proche de 200 km, sans que soient réellement précisées les vitesses moyennes liées à ce degré d'autonomie.
- Les temps de recharge : Les bornes de recharge actuelle, qu'elle soient domestiques¹ ou publiques, permettent de répondre au cycle d'utilisation urbain quotidien par une recharge nocturne. Mais, pour une utilisation journalière impliquant un kilométrage plus élevé, la longueur du temps de charge implique que d'autres solutions soient envisagées, comme l'échange standard de batteries qui suppose une technologie adaptée (il s'agit de manipuler 200 à 400 kg) et un déploiement de réseaux de distribution.
- La fiabilité à long terme : Elle dépend de la résistance des batteries aux cycles charge/recharge pour des utilisations

¹ Les véhicules électriques se rechargent normalement dans des lieux privés à partir d'une prise de 16 A protégée par un disjoncteur différentiel de 30 mA, identique à celui d'une salle de bains (Parlement, 2005).

moyennes de véhicules de l'ordre de 12 500 km par an et pour un parc où 50% des véhicules ont au moins plus de dix ans.

Toutefois, plusieurs observateurs estiment que la filière tout électrique et la filière hybride pourrait trouver un horizon commun (Parlement, 2005). Le principe d'un véhicule offrant la possibilité de rouler exclusivement à l'électricité dans le cadre des déplacements urbains quotidiens tout en permettant de recourir à la motorisation thermique classique sur de plus grandes distances constitue une perspective hautement prometteuse. 60% des trajets journaliers seraient couverts par un véhicule hybride rechargeable (VHR) disposant d'une autonomie électrique de 30 km et 70% avec une autonomie de 40km. EDF a mené des études pour évaluer les émissions de CO₂ du moteur à la roue d'un véhicule familial moyen essence. Ce véhicule émet normalement 155g de CO₂/km. S'il s'agit d'un hybride de type Prius environ 100g, s'il s'agit d'un VHR ayant une autonomie comprise entre 10 et 60 km, il émettrait en France entre 80 et 40g de CO₂/km. Ainsi le VHR permettrait d'atteindre l'objectif du facteur 4 dans le secteur automobile.

⇒ *La voiture à pile à combustible hydrogène : mythe et réalité*

Depuis plus d'une décennie, l'économie de l'hydrogène est identifiée comme une des solutions de substitution à l'économie pétrolière qui a porté le développement de la planète depuis plus d'un siècle. Dans le cadre d'une stratégie de réduction des émissions de CO₂ du secteur des transports, le principal avantage de l'hydrogène réside dans le fait que celui-ci ne comprend aucune molécule de carbone (J.Rifkin, 2002). Le recours à l'hydrogène entraîne par ailleurs une nouvelle approche des ressources énergétiques primaires puisque celui-ci

ne discrimine plus les territoires. L'hydrogène est l'élément le plus universellement répandu puisqu'il représente : 75% de la masse de l'univers et 90% des molécules qui le composent ; 30% de la masse du Soleil ; 70% de la surface terrestre.

L'utilisation de l'hydrogène comme carburant dans le secteur des transports repose sur le recours aux piles à combustible. Celles-ci consistent à produire de l'électricité à partir de la réaction inverse de l'électrolyse de l'eau (séparation des molécules d'hydrogène et d'oxygène en faisant passer un courant électrique dans l'eau). Dans une pile à combustible, dont le procédé a été découvert en 1839 par l'anglais William Grove, l'hydrogène est introduit au niveau de l'anode et y est décomposé en protons et en électrons par un catalyseur ; les protons transitent de l'anode vers la cathode où ils se combinent à l'oxygène de l'air pour donner de l'eau ; les électrons rejoignent la cathode en transitant par un circuit externe, lequel récupère l'énergie électrique ainsi produite. C'est Francis Bacon qui réalise la première véritable pile à combustible hydrogène-oxygène vers 1935, qui aboutira en 1953 à la fabrication d'un premier générateur de 1 kW électrique. Cette réalisation mit en évidence les différents avantages de cette pile : fonctionnement silencieux (pas de pièces mobiles), rendement très élevé (conversion de l'énergie du combustible en travail jusqu'à un taux de 60% contre 30% environ pour les moteurs à combustion interne), possibilité d'utilisation en stationnaire ou en traction (Parlement, 2005). Il faudra attendre les années 1970 et le premier choc pétrolier pour que les recherches concernant les applications à l'automobile des piles à combustible prennent leur véritable essor (Parlement, 2001). Toutefois, au début des années 1980, le constat sera fait des

profondes incertitudes qui caractérisent cette filière, de nombreux verrous technologiques restant à être levés malgré plusieurs années de recherche. Ce n'est qu'à partir des années 1990 que le « mythe » de l'économie de l'hydrogène réapparaît.

Toutefois, le développement de la filière présente encore aujourd'hui plusieurs limites de taille (Parlement, 2005). Tout d'abord, les progrès sur les batteries électriques confèreraient aux véhicules électriques ou hybrides « classiques » un avantage décisif par rapport aux véhicules fonctionnant à l'hydrogène. Deux autres limites concernent la mise au point de la pile à combustible. En l'état actuel de la technologie, seul le platine est véritablement efficace pour la constitution du catalyseur. Or on extrait seulement 200 à 300 tonnes de ce métal par an dans le monde. Le nombre théorique de piles à combustible que l'on peut construire paraît donc très limité. Il faut donc réussir soit à en diminuer très fortement les quantités (division par 10), soit à trouver un autre matériau. Par ailleurs, La membrane joue le rôle essentiel d'électrolyte, c'est à dire de substance permettant la dissociation, en présence d'eau, d'un élément en ions chargés négativement et positivement. Elle doit en même temps être conductrice tout en étant très stable chimiquement, très fine et très solide. La membrane pose ainsi de nombreuses difficultés en raison de l'insuffisance des performances du matériau actuellement utilisé, le Nafion.

Une autre catégorie de limites concerne le carburant, l'hydrogène. Celui-ci n'existe pas à l'état isolé dans la nature : présent dans l'eau, dans les combustibles fossiles et dans tous les êtres vivants, il a besoin d'être dissocié. Or, force est de constater que la seule méthode de production vertueuse sur le plan des émissions de gaz à effet de serre –

l'électrolyse de l'eau – est aujourd'hui très peu développée à l'échelle mondiale, en raison de coûts particulièrement élevés. Fortement polluante, la production d'hydrogène par transformation de combustibles fossiles – qui est à l'origine de 96% de l'hydrogène consommé chaque année dans le monde – génère elle-aussi à des coûts prohibitifs puisque équivalents à 120\$ le baril de pétrole. Deuxièmement, l'application de l'hydrogène à l'automobile accentue le problème du stockage évoqué plus loin pour la question de la conversion de l'électricité en hydrogène : trois kg d'hydrogène comprimé à 200 bars permettent d'assurer une autonomie de 300 km mais exigent un réservoir de 200 kg d'un volume encore important ; si la liquéfaction permet véritablement de stocker l'hydrogène dans des volumes plus compatibles avec une utilisation automobile, elle présente l'inconvénient de réduire de près d'un tiers le pouvoir calorifique de l'hydrogène. De plus, la distribution de l'hydrogène suppose des investissements d'infrastructures considérables si l'on souhaite que celle-ci soit aussi diffuse que celle des produits pétroliers.

Le secteur des transports : développer les réseaux de transports électriques

La promotion des modes de transports les plus économiques en matière de consommation d'énergie (cf. point sur le développement des modes de transports alternatifs à la route) peuvent correspondre à la promotion de modes reposant sur l'absence de recours à une énergie mécanique : vélo et marche à pieds dans le cas des déplacements de personnes. Plus fréquemment, il s'agit de promouvoir des modes de transports qui sont par ailleurs faiblement émetteurs de CO2 dans

la mesures où ils fonctionnent grâce à l'électricité : train, métro, tramway, trolleybus. Autrement dit, les stratégies de développement des modes de transports les plus efficaces convergent avec celles concernant le développement de filières de production d'électricité « propres » : nucléaires, renouvelables.

LES PRINCIPAUX ACTEURS DE LA RECHERCHE EN MATIÈRE DE TECHNOLOGIES DES TRANSPORTS EN RÉGION LYONNAISE

La région lyonnaise se veut actrice de l'avenir des transports. Elle comprend en effet de nombreux organismes (grandes entreprises, PME-PMI, laboratoires de recherche publics) impliqués dans des travaux de recherche s'inscrivant dans les perspectives décrites plus haut. Au delà du recensement exhaustif de ces organismes, il est important de mettre en évidence les plus importants d'entre eux à l'échelle internationale, ainsi que les actions qu'ils conduisent actuellement, au sein notamment de différents pôles de compétitivité.

Les acteurs lyonnais des technologies d'économie d'énergie dans les transports

L'amélioration des moteurs conventionnels, voie de recherche majeure de l'IFP et le pôle de compétitivité lyonnais «Lyon Urban Truck&Bus 2015 »

L'Institut Français du Pétrole (IFP), dont la principale antenne de recherche (630 personnes) est basée à Solaize au sud de Lyon, poursuit des recherches dans les principales directions décrites plus haut en ce qui concerne l'amélioration de l'efficacité des moteurs conventionnels :

- l'amélioration de l'injection directe sur les moteurs existants : Dans ce domaine, les travaux visent à élaborer des algorithmes et des stratégies de contrôle électronique du moteur innovants et robustes. L'IFP a ainsi développé ses propres structures de contrôle

du couple pour des applications sur moteurs essence, diesel et gaz naturel. Le calibrage – c'est-à-dire le paramétrage du système de contrôle électronique – fait également l'objet de travaux importants.

- la généralisation de la suralimentation à des fins de « downsizing » : La réduction de la consommation des moteurs diesel grâce à la suralimentation et l'adaptation de ce principe aux moteurs essence constitue un axe de recherche important de l'IFP. Celui-ci poursuit notamment les améliorations de son procédé basé sur le balayage des gaz brûlés résiduels. Ce dernier, développé à l'origine sur une base moteur à injection directe (IDE), est désormais complètement validé en injection indirecte avec des gains similaires. On obtient, par exemple, entre 30 et 40% de couple supplémentaire à très bas régime. Le concept du downsizing est également analysé dans le cas de petites cylindrées afin d'identifier son potentiel ultime.

- la mise au point de nouveaux processus de combustion : A ce titre, grâce à sa double expertise dans les moteurs et carburants, l'IFP participe à deux partenariats internationaux organisés en vue de la mise au point de nouveaux modes de combustion, le Consortium international Diesel HCCI (Homogeneous charge compression ignition) et le Consortium international Essence CAI (Controlled Auto-Ignition). Les travaux conduits dans ce cadre visent notamment à s'assurer de l'adéquation

(maîtrise des interactions physico-chimiques) entre ces nouvelles technologies moteur et les carburants disponibles actuellement, qu'ils soient d'origine pétrolière ou carburants alternatifs (issus du gaz ou de la biomasse). Une partie de ces travaux axés sur la combustion est opérée en collaboration avec PSA Peugeot Citroën et Renault au sein du Groupement scientifique moteurs (GSM). La position de leader de l'IFP dans ces domaines de recherche repose en particulier sur les compétences poussées qu'il détient en matière de modélisation du groupe motopropulseur.

L'action de recherche de l'IFP en matière d'amélioration des performances des moteurs conventionnels s'inscrit aujourd'hui dans un nouvel environnement en région lyonnaise avec la labellisation en 2005 par le Comité Interministériel pour l'Aménagement du territoire du pôle de compétitivité « Lyon Urban Truck&Bus 2015¹ ». Un des projets de R&D de ce pôle de compétitivité concerne en effet l'ensemble « Motorisation et chaîne cinématique » avec notamment comme objectif l'optimisation des moteurs thermiques (diesel, allumage commandé...).

¹ Avec l'appui du Grand Lyon et de la CCI de Lyon, l'association Lyon Urban Truck&Bus 2015 a été créée à l'initiative de Renault Trucks, Irisbus France, l'Institut Français du Pétrole (IFP), l'Institut National pour la Recherche dans les Transports et leur Sécurité (INRETS). L'ambition de Lyon Urban Truck & Bus 2015 est de répondre aux défis soulevés par la croissance des besoins de mobilité, des personnes et des marchandises dans un environnement urbain. Il s'agit de travailler sur le camion et le bus urbain afin de promouvoir des systèmes de transports urbains plus économes, plus sûrs, plus propres, plus fiables et mieux intégrés dans leur environnement.

La motorisation hybride, autre enjeu de recherche pour l'IFP et « Lyon Urban Truck&Bus 2015 »

L'IFP travaille plusieurs approches couvrant les différents niveaux d'hybridation envisageables sur un véhicule (système Stop & Start, récupération d'énergie au freinage...). Une première démarche porte sur la conception et l'architecture des moteurs thermiques afin d'optimiser leurs performances dans le contexte d'une application hybride. L'IFP développe également des stratégies de contrôle innovantes visant à optimiser le fonctionnement du moteur et la gestion de l'énergie à bord du véhicule. Plusieurs projets d'application sont envisagés. L'un d'entre eux porte sur le développement d'un démonstrateur hybride sur la base d'un véhicule automobile à vocation urbaine alimenté au gaz naturel. Une première démonstration réalisée (en collaboration avec Gaz de France) avec un véhicule de série Toyota Prius full hybrid adapté au gaz naturel a d'ailleurs permis d'atteindre des gains de consommation records au dernier Challenge Bibendum : 3,56 kg de GNV pour 144 km, soit l'équivalent d'une consommation de 3,63 litres d'essence au 100 km. Ce véhicule présente ainsi un niveau d'émissions de CO₂ particulièrement réduit : moins de 85 g/km sur cycle normalisé.

Le développement de différentes motorisations hybrides constitue par ailleurs le deuxième objectif du projet de R&D « Motorisation et chaîne cinématique » du pôle de compétitivité « Lyon Urban Truck&Bus 2015 ».

Les véhicules de transports collectifs urbains de demain, l'un des horizons de projet de « Lyon Urban Truck&Bus 2015 »

L'un des enjeux que cherche à relever le pôle de compétitivité lyonnais réside dans la mise au point de véhicules de transports collectifs urbains hautement performants, c'est à dire susceptibles de prendre en charge une part croissante des déplacements de personnes en milieu urbain. Pour ce faire l'un des projets de R&D porte sur l'amélioration de l'architecture et du confort des véhicules. Ce volet articule trois axes de travail :

- Technologies : structure véhicules, nouveaux matériaux, intégration des motorisations hybrides, nouveaux concepts ;
- Performances du système : amélioration des prestations véhicules, optimisation du rendement des chaînes de traction, optimisation des consommations globales du système ;
- Prestations : allègement, traitement des vibrations et du bruit, accessibilité, nouvelles architectures innovantes.

Outre l'IFP, le pôle de compétitivité «Lyon Urban Truck&Bus 2015 » compte la participation de deux autres centres de recherche d'envergure en matière de transports.

- L'Institut National de Recherche sur les Transports et leur Sécurité (l'INRETS) : créé par décret interministériel du 18 septembre 1985, l'INRETS a pour mission d'effectuer ou d'évaluer toutes les recherches et tous les développements technologiques consacrés à l'amélioration pour la collectivité, des systèmes et moyens de transports et de circulation du point de vue technique, économique et social. Le Comité Interministériel d'Aménagement et

de Compétitivité des Territoires (CIACT) a entériné le 14 octobre 2005 le déménagement de l'INRETS sur le site de Lyon-Bron, où sont déjà implantés cinq de ses laboratoires. D'ici à la fin 2008, la Direction générale et le Secrétariat général de l'Institut prendront leur place au sein d'un nouveau bâtiment. L'activité scientifique de l'INRETS est organisée en trois axes : Accroître la sécurité des personnes ; Optimiser l'usage des réseaux de transport ; Accroître la fiabilité et la durabilité des systèmes de transport, optimiser leur consommation énergétique et réduire leur impact sur l'environnement.

- Le Laboratoire d'Economie des Transports : équipe pluridisciplinaire créée il y a 30 ans et regroupant aujourd'hui une soixantaine de personnes, le LET est la principale équipe de recherche française dans son domaine. L'une des spécificités du laboratoire réside dans son double ancrage académique et sectoriel. A la production scientifique traditionnelle des équipes de recherche s'ajoutent des activités contractuelles et d'expertise contribuant à l'aide à la décision des pouvoirs publics. Les axes de recherche du LET répondent aux principaux enjeux du champ de recherche largement déployé à l'échelle internationale sous le vocable de « Transportation science ». Généralement liés à des contrats de recherche, ces axes sont les suivants : Marchés, organisations et systèmes d'incitations (calcul économique ; évaluation, tarification et financement des infrastructures de transport...) ; Mobilité et usages de l'espace et du temps (budgets temps ; accessibilité et politique de mobilité durable ; localisation des

activités et formes urbaines...); Modélisation et simulation de la mobilité des personnes et des marchandises (modélisation des déplacements de marchandises en ville; simulation et prospective de la mobilité urbaine des personnes...).

La promotion des modes de transports « doux », l'initiative « Vélo'v » du Grand Lyon

Favoriser les déplacements urbains à vélo passe notamment par une action spécifique concernant l'accès aux vélos eux-mêmes. En la matière, plusieurs villes françaises, Rennes, La Rochelle et Strasbourg, se sont lancées dès les années 1990 dans la mise à disposition de bicyclettes pour circuler en ville. Toutefois, des recherches (INRETS, 2003) ont montré que ces expériences se révélaient trop modestes pour que leur impact soit sensible en termes de report modal. De ce point de vue, les politiques conduites dans d'autres pays européens tels que les Pays-Bas, l'Allemagne ou la Suisse, apparaissent plus volontaristes, avec des résultats significatifs à la clef.

Ainsi, depuis mai 2005, l'agglomération lyonnaise, à l'initiative de la communauté urbaine, est passée à la vitesse supérieure et s'est engagée dans la mise en place progressive d'un dispositif de mise à disposition de vélo en libre-service. Baptisé Vélo'v et gérée par la société JCDecaux dans le cadre du marché d'exploitation et de renouvellement du mobilier urbain que lui a confié le Grand Lyon en 2004, cette démarche se veut résolument ambitieuse et innovante. Elle propose actuellement 3 000 vélos répartis sur 250 stations, lesquelles ont été implantées sur les communes de Lyon et Villeurbanne à proximité des gares et transports en commun et de telle sorte qu'il y ait une station vélo

tous les 300 mètres en moyenne et à moins de 5 minutes à pied l'une de l'autre. En 2007, l'offre sera encore étendue pour atteindre 4 000 vélos répartis sur 340 stations (Grand Lyon, 2007). L'accès aux vélos s'effectue grâce à une carte d'abonnement de courte ou de longue durée – la première est disponible directement dans les bornes électroniques de chaque station, la seconde via une inscription sur Internet – selon le principe que le service ne devient payant qu'au delà d'une demi-heure d'utilisation. Sur un plan technique, les vélos proposés se distinguent par leur robustesse et leur simplicité. Conçus par la vénérable entreprise stéphanoise « Cycle Mercier »¹, ils sont notamment équipés de moyeu à vitesses intégrées (3 vitesses, ni dérailleur, ni pignons). Le succès du dispositif Vélo'v est incontestable. Après une première année pleine de fonctionnement en 2006, il s'est définitivement imposé comme un véritable moyen de transport collectif individuel : 487 024 cartes courte durée ont été achetées ; 5 520 000 locations ont été effectuées soit une moyenne de 15 123 locations par jour ; 11 300 000 kms ont été parcourus soit 283 fois le tour de la terre ou 5 000 kms par vélo. Cette initiative ne cesse de séduire de nouvelles agglomérations, Marseille, Aix-en-Provence et Bruxelles s'étant depuis engagé à en faire bénéficier leur territoire (mavilleavelo, 2007).

¹ La marque des cycles Mercier fut fondée à Saint-Étienne par Émile Mercier (1899-1973). La marque se dote d'une équipe cycliste professionnelle dès 1920. Mercier reste en compétition jusqu'en 1984, date du dépôt de bilan. Les salariés reprennent l'entreprise en 1985. C'est le renouveau qui s'appuie sur la grande distribution, délaissant les réseaux classiques des petits revendeurs. La production annuelle pour 2005 est d'environ 120 000 bicyclettes (également sous la marque Poulidor), dont 1 200 pour l'opération vélo'v (Wikipedia, 2006).

Les acteurs lyonnais des technologies énergétiques alternatives aux hydrocarbures et aux moteurs à explosion

Les biocarburants, autre axe majeur des recherches conduites par l'Institut Français du Pétrole

L'IFP travaille depuis 1980 dans le domaine des biocarburants avec, en particulier, la mise au point au début des années 1990 du procédé Esterfip de production de biodiesel à partir d'huile de colza et de méthanol par catalyse homogène. Depuis, L'IFP a développé un nouveau procédé de production de biodiesel par catalyse hétérogène Esterfip-H. Cette nouvelle génération conduit à des performances améliorées, avec un biodiesel de meilleure qualité et moins de sous-produits. Une première génération du catalyseur correspondant ayant été industrialisée en 2005, le procédé Esterfip-H, commercialisé par Axens, sera mis en oeuvre en 2006 par la société Sofiproteol à Sète, ce qui constitue une première industrielle mondiale. Les objectifs des travaux de R&D en cours visent la réduction des coûts et le développement de nouveaux procédés pour la valorisation du glycérol (sous-produit de la réaction).

Par ailleurs, l'IFP cherche à développer de nouvelles filières énergétiques par conversion de biomasse lignocellulosique d'origines forestière et agricole (bois, paille, cultures dédiées, déchets végétaux, etc.) de manière à accéder à une ressource moins limitée, qui n'entre pas en concurrence avec l'usage alimentaire. Pour cela, l'IFP étudie les transformations facilitant le transport de la biomasse, parmi lesquelles la pyrolyse rapide ou la torréfaction. Dans ce domaine, une attention

particulière est portée à la caractérisation fine des produits qui en sont issus dans la perspective de leurs utilisations (biocarburants, charges d'unités de raffinage ou de gazéification). L'IFP étudie également la mise au point d'une technologie de gazéification pour la production de gaz de synthèse, à partir de laquelle des carburants de synthèse Fischer-Tropsch ou de l'hydrogène seront produits. Le développement d'un procédé de production à haut rendement de bioéthanol à partir de lignocellulose est également à l'ordre du jour avec, en 2005, le démarrage du projet européen Nile (New improvements for lignocellulosic ethanol) que l'IFP coordonne. Il vise à mettre au point de nouvelles technologies pour une conversion efficace de la lignocellulose en éthanol avec validation de ces technologies dans un pilote et estimations technico-économiques et environnementales. D'une durée de quatre ans, ce projet intégré rassemble une vingtaine de partenaires. Il bénéficie également du soutien de l'Agence Nationale de la Recherche.

Les biocarburants, objet de recherche du centre de recherche de Total

Situé à Solaize, le centre de recherche de Total s'appuie sur une équipe de 230 personnes. Le développement et l'amélioration des performances des biocarburants figurent parmi ses axes de travail.

ANNEXE :
**PROPOSITION DE HIÉRARCHIE DES AVANCÉES TECHNIQUES DANS LE DOMAINE DES TRANSPORTS
À L'ÉCHELLE MONDIALE ET À L'ÉCHELLE DE LA RÉGION LYONNAISE**

Pour embrasser d'un regard l'ensemble de l'histoire des techniques des transports et la participation de la région lyonnaise à celle-ci, il est apparu utile de tenter une hiérarchisation des avancées techniques majeures décrites dans la première partie de ce document.

Deux critères de choix complémentaires orientent la classification : portée de la rupture technique produite + ampleur de la diffusion dans les processus productifs, les pratiques quotidiennes...

On remarquera que bon nombre de ces avancées concernent les techniques de l'énergie avec lesquelles le système de transport entretient des relations étroites.

A l'échelle mondiale :

1. Première utilisation de la force animale pour le transport (-5000 ans avant JC)
2. Invention de la roue (-4300 avant JV)
3. Apparition des premières embarcations pour la navigation sur l'eau (-50000 ans avant JC)
4. Première utilisation du vent pour la propulsion des bateaux (-3000 ans)
5. Invention du moteur à explosion (1860-1864)
6. Mise au point de la machine à vapeur (1700-1800)
7. Mise au point de la chaudière tubulaire
8. Premier vol d'un avion motorisé (1890)
9. Invention du générateur électrique (1869-1873)
10. Mise au point de trains à grande vitesse (à partir de 1960)

A l'échelle de la région lyonnaise :

1. Mise au point de la locomotive à vapeur à chaudière tubulaire à Lyon par Marc Seguin (1829)
2. Ouverture de la première ligne de chemin de fer à traction animale d'Europe entre Saint-Etienne et Andrézieux par Louis-Antoine Beaunier (1827)
3. Invention du premier aéronef par les frères Montgolfier à Annonay (1782)
4. Ouverture de la première ligne de chemin de fer à traction à vapeur de France entre Lyon et Saint-Étienne par Marc Seguin (1830)
5. Naissance à Lyon de la société Berliet, future leader mondial de la construction de véhicules utilitaires poids durant le 20^{ème} siècle (1899)
6. Première navigation d'un bateau à vapeur à roue à aubes sur la Saône au niveau de Lyon (1783)
7. Contribution décisive à la formation d'une science de l'aéronautique par le lyonnais Louis Mouillard (1881)

8. Mise en service du premier funiculaire au monde à Lyon (1862)
9. Mise en service de la première ligne automatique de métro à grand gabarit au monde à Lyon (1991)
10. Mise en service de la première ligne de transports urbains fluviaux de France à Lyon (1863)

SOURCES

Histoire des techniques des transports

<http://fr.wikipedia.org/wiki/Accueil>

http://gazoline.net/article.pcgi?id_article=53 - 89 -

Andric D., Gavric B. et Simons M.J. – Les bicyclettes. 200 ans d'histoire de la « petite Reine » - Kranj (Yougoslavie) : Arts Mundi, 1990

Association des amis de la fondation de l'automobile Marius Berliet – Histoire du poids lourd : chronologie – Lyon : Fondation Marius Berliet, 2004

Baudet Jean – De l'outil à la machine : histoire des techniques jusqu'en 1800 – Paris : Vuibert, 2003

Baudet Jean – De la machine au système : histoire des techniques depuis 1800 – Paris : Vuibert, 2004

Bellu Serge – Histoire mondiale de l'automobile – Paris : Flammarion, 1998

Berthon Maurice-Edouard – Dictionnaire des inventions et des techniques – Paris : Publications Universitaires, 2004

Borgé J, Viassnoff N. – Berliet de Lyon – Editions EPA, 1981

Borgé Guy et Marjorie, Clavaud René – Les transports à Lyon. Du tramway au métro – Lyon : Jean Honoré éditeur, 1984

Breton Tristan-Gaston, Kapferer Patricia – Renault Trucks – Paris : Le cherche midi, 2005

Butin Jean – Lyonnais de l'aventure – Lyon : Editions lyonnaises d'art et d'histoire – 2005

Chapelle Monique – Berliet – Brest : Le Télégramme, 2005

Combe Jean-Marc, Lamming Clive, Papazian André, Poré Jacques – Au cœur des trains – Paris : Hachette, 2003

Giscard d'Estaing Valerie-Anne (sous la direction de) – Le livre mondial des inventions 2000 – Paris : Fixot, 1999

Giscard d'Estaing Valerie-Anne (sous la direction de) – Le livre mondial des inventions 1989 – Paris : Fixot, 1999

Laferrère Michel – Lyon, ville industrielle – Paris : PUF, 1960

Marck Bernard – Histoire de l'aviation – Paris : Flammarion, 1997

Muron Louis – Marius Berliet – Lyon : éditions LUGD, 1995

Rivet Félix – La navigation à vapeur sur le Rhône et la Saône – Paris : PUF, 1962

Varasclin Alain et Denis – La construction du canal de Jonage – La Luiraz, 1994

Les tendances du secteur de l'énergie aujourd'hui en France / Les défis technologiques de l'avenir des transports

<http://www2.ademe.fr/servlet/getDoc?id=11433&m=3&cid=96>

<http://www2.equipement.gouv.fr/statistiques/backoffice/T/memento2004/bdiff19122006normalise/index.html>

<http://www.x-environnement.org/jr/JR04/jancovici.html>

http://www.minefi.gouv.fr/themes/energie_mat_premieres/energie/index.htm

<http://www.mavilleavelo.com>

Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie – Transports de marchandises, énergie, environnement et effet de serre – Paris, 2006

Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie – Les véhicules particuliers en France. Données et références 2006 – Paris, 2006

Agence Internationale de l'Energie – Key world energy statistics 2006 – Paris, 2006

Agence Internationale de l'Energie – World energy outlook 2006 – Paris, 2006

Agence Internationale de l'Energie – World energy outlook 2004 – Paris, 2004

Agence d'urbanisme pour le développement de l'agglomération lyonnaise, Grand Lyon – Vers quels lendemains allons-nous? Prospective pour la métropole lyonnaise – Lyon, 2005

Assemblée nationale (Mission d'information sur l'effet de serre) – Rapport – Paris, 2006

Assemblée nationale – L'efficacité énergétique dans l'Union européenne – Paris, 2006

Assemblée nationale – Rapport d'information sur la politique de soutien au développement des énergies renouvelables – Paris, 2003

Barci Edwige, Bernusset Alexandre et Coulombel Nicolas – Marché des déplacements interrégionaux et internationaux de voyageurs. Concurrence TGV- avion – Paris, ENPC, 2004

Breton Tristan-Gaston, Kapferer Patricia – Renault Trucks – Paris : Le cherche midi, 2005

Chabanel Boris - Pour une planification territoriale métropolitaine. La démarche inter-Scot – Lyon : Université Lyon III, Agence d'urbanisme pour le développement de l'agglomération lyonnaise, 2004

Comité des constructeurs français d'automobiles – L'industrie automobile françaises. Analyses et statistiques 2006 – Paris, 2006

Commissariat général au plan – Transports urbains : quelles politiques pour demain ? – Paris, 2003

Conseil d'analyse stratégique (Commission « Energie ») – Rapport d'étape – Paris, Premier Ministre, 2006

Conseil d'analyse stratégique (Commission « Energie ») – Rapport du Groupe 1 « Enseignements du passé » – Paris, Premier Ministre, 2006

Conseil d'analyse stratégique (Commission « Energie ») – Rapport du Groupe 2 « Perspectives offre/demande » – Paris, Premier Ministre, 2006

Conseil économique et social – Recherches et technologies du futur : quelles orientations pour la production et la consommation d'énergie ? – Paris, 2006

Conseil économique et social – Une nouvelle dynamique pour le transport intermodal – Paris, 2006

Conseil général des ponts et chaussées – Démarche prospective transports 2050. Eléments de réflexion – Paris : Ministère des transports, de l'équipement, du tourisme et de la mer, 2006

Conseil général des Ponts et Chaussées – Maîtrise des émissions de gaz à effet de serre de l'aviation civile – Paris, 2005

Dupuy Gabriel – La dépendance automobile : symptômes, analyses, diagnostic, traitements – Paris : Economica, 1999

Fédération nationale des agences d'urbanisme – Des aires urbaines... aux systèmes métropolitains. Une première approche – Paris, 2006

Grand Lyon – Velo'v. La newsletter – Lyon : n°14, janvier 2007

Groupe d'experts intergouvernemental sur les changements climatiques (GIEC) – Bilan 2001 des changements climatiques : Les éléments scientifiques – 2001

Groupe « Facteur 4 » – Division par quatre des émissions de gaz à effet de serre de la France à l'horizon 2050 – Paris, Ministère de l'économie, des finances et de l'industrie, Ministère de l'écologie et du développement durable, 2006

Institut National de la Statistique et des Études Économiques (Délégation Rhône-Alpes) – L'année économique et sociale 2005 – Lyon, 2006

Institut français du pétrole – Le point sur la Gaz Naturel pour Véhicules (GNV) – Lyon, 2006

Institut National de Recherche sur les Transports et leur Sécurité – Écomobilité : Les déplacements non motorisés, éléments clés pour une alternative en matière de mobilité urbaine – Arcueil, 2003

Le Breton Eric – Bouger pour s'en sortir. Mobilité quotidienne et intégration sociale – Paris : Armand Colin, 2005

Ministère de l'écologie et du développement durable – Recommandations pour un développement durable des Biocarburants en France – Paris, 2006

Ministère de l'économie, des finances et de l'industrie – Les émissions de CO2 liées à la combustion d'énergie dans le monde en 2003-2004 – Paris, 2006

Ministère de l'économie, des finances et de l'industrie – Consommations de carburants des voitures particulières en France 1988-2004 – Paris, 2005

Ministère de l'économie, des finances et de l'industrie – L'optimisation du dispositif de soutien à la filière biocarburants – Paris : 2005

Ministère délégué à la recherche – Nouvelles technologies de l'énergie : proposition de programme de recherche – Paris, 2005

Ministère délégué à la recherche – Nouvelles technologies de l'énergie – Paris, 2004

Ministère des transports, de l'équipement, du tourisme et de la mer – Les comptes des transports en 2005 – Paris : 2006

Moisan François – La croissance du transport aérien face aux enjeux de l'effet de serre – Colloque Transport Aérien et Développement Durable Paris : IEP Paris, 2006

Orfeuil Jean-Pierre (sous la direction de) – Transports, pauvretés, exclusions. Pouvoir bouger pour s'en sortir – La Tour d'Aigues : Editions de l'Aube, 2004

Parlement (Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques) – Les apports de la science et de la technologie au développement durable ». Tome I : « Changement climatique et transition énergétique : dépasser la crise » - Paris : 2006

Parlement (Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques) – L'état actuel et les perspectives techniques des énergies renouvelables – Paris : 2006

Parlement (Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques) – Les nouvelles technologies de l'énergie et la séquestration du dioxyde de carbone : aspects scientifiques et techniques – Paris : 2006

Parlement (Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques) – Définition et implications du concept de voiture propre – Paris : 2005

Parlement (Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques) – Les perspectives offertes par la technologie de la pile à combustible – Paris : 2001

Les principaux acteurs de la recherche en matière de technologies énergétiques en région lyonnaise

<http://www.axelera.org/>

http://www.ifp.fr/IFP/fr/ifp/fb12_03.htm

<http://www.ifp.fr/IFP/fr/rechercheindustrie/moteurscarburants/fc05.htm>

<http://www.inrets.fr/>

<http://www.let.fr/>

Association Lyon Urban Truck & Bus 2015 – Les grands projets du pôle de compétitivité. Dossier de presse – 2006

