Transports – N°480 / juillet-août 2013, pages 5-16

La route peut-elle capter plus que jusqu'à présent l'apport des nouvelles technologies ?

Nicolas Hautière, Directeur de projet
Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux

Abstract
Face à la crise économique et budgétaire, les routes françaises peinent à effectuer leur transition écologique, contrairement à l'industrie automobile qui investit massivement en recherche et développement, ce avec le soutien de l'Etat. Dans ce contexte, les routes doivent-elles se régénérer en s'intégrant dans des démarches de développement durable et en synergie avec les véhicules intelligents qui les parcourent ou doivent-elle se réinventer en même temps que de nouvelles formes de mobilité prendront la relève, mettant ainsi fin à la mobilité individuelle telle que nous la connaissons actuellement. Pour avoir le choix entre ces deux alternatives, encore faut-il se doter des moyens de les évaluer et d'innover dans le domaine routier. C'est l'enjeu auquel le projet R5G initié par l'Ifsttar tente d'apporter une réponse. L'article qui suit vise à présenter quelques clés de ce débat de société.

Introduction

La mobilité fait partie des besoins parmi les plus fondamentaux. L'essor de l'automobile conjugué au développement du réseau routier sur l'ensemble du territoire a permis de démocratiser l'accès à la mobilité pour tous. Aujourd'hui, la route constitue un moyen de transport souple et encore relativement bas coût. En tant qu'infrastructure de transport, elle contribue également à la croissance économique nationale (Didier et Prud'homme, 2007). Ainsi, que ce soit pour transporter des biens ou des personnes, la route représente environ 85 à 90 % des déplacements, ce malgré les politiques de transport qui ont plutôt pour effet d'augmenter le coût du transport routier, généralement au profit du transport ferroviaire.

Une telle prédominance du mode routier a de nombreuses conséquences. Tout d'abord, le montant financier nécessaire pour entretenir le patrimoine routier (plus d'un million de kilomètres de route) s'avère de plus en plus difficile à réunir, notamment pour les collectivités locales. Les critiques se font également de plus en plus nombreuses. Outre les problèmes de sécurité routière qui tendent à s'atténuer, la route est accusée entre autres de portée atteinte à la biodiversité, d'avoir une empreinte carbone trop élevée, d'être peu efficace au plan énergétique, de consommer trop de matériaux. Dans un contexte de crise économique et de transition écologique, la route s'est retrouvée exclue des politiques nationales de transition durable (Grenelle de l'Environnement, Investissements d'Avenir). Ainsi, le concept de mobilité durable semble s'inventer sans la route. Pourtant, quand vient l'heure des bilans, fort est de constater que le secteur du transport est plutôt en retard par rapport aux autres secteurs en matière de respect des engagements de réduction des émissions de gaz à effet de serre à l'horizon 2050 (CGEDD, 2013).

Ces enjeux appellent sans doute avant tout de nouvelles sources énergétiques pour les véhicules. Mais ils nécessitent aussi un nouvel art de construction des routes, non seulement soucieux de diminuer les nuisances liées à leur propre fonction, mais aussi apte à participer activement à l'amélioration du cadre de vie dans les villes et les campagnes. Dans un contexte d'urbanisation toujours croissante, la mobilité choisie doit être rendue durable et la mobilité contrainte acceptable, en favorisant davantage la circulation des transports en communs ou encore en développant de nouvelles solutions de mobilité.

En effet, la route a toujours su s'adapter aux défis de la société. Si au départ, elles étaient conçues pour le déplacement des cavaliers, ces routes de 1ère génération se sont revêtues de pavés pour permettre aux services de poste et à l'armée de parcourir plus rapidement l'ensemble de l'Empire romain. Les routes romaines peuvent donc être considérées comme les routes de seconde génération. Au début du XXe siècle, avec l'essor du trafic automobile mais aussi avec le développement de la bicyclette, qui avait besoin de chaussées de meilleure qualité, ces dernières, constituées de gros cailloux, préalablement tassées au rouleau compresseur, sont revêtues de goudrons, de pavés bitumineux ou d'asphalte, comme déjà pratiqué pour les trottoirs depuis le début du XIXe siècle, donnant ainsi naissance aux routes de 3ème génération. Mais l'automobile continuait à utiliser les chemins et axes de transports des chevaux et hippomobiles, suivant des tracés qui n'avaient pas été créés pour elle. L'autoroute ou route de 4ème génération est l'invention qui, au lendemain de la deuxième guerre mondiale, va répondre aux besoins de la voiture et des poids-lourds, tant du point de vue de la vitesse que de la sécurité. Ainsi, les routes ne connaissent pas de fin de vie. Elles sont vouées à se rénover en permanence, à changer de fonction et à en supporter de nouvelles. Elles cristallisent les innovations qui répondent le mieux aux enjeux de société d'une époque.

Quelles routes alors pour le futur ? Le choix est en grande partie politique, ouvert au débat de société, que l'on peut tenter de résumer ainsi. Doit-on chercher à optimiser les infrastructures routières pour les faire se conformer aux objectifs sociétaux au risque d'en accroitre encore la prépondérance ou doit-on se laisser tenter par une forme de décroissance du mode routier au risque de pénaliser l'économie et les territoires qui en dépendent ? Pour éclairer ce débat public complexe et notamment éviter un choix par défaut, les ingénieurs et chercheurs se doivent de développer et d'évaluer les briques technologiques susceptibles d'entrer dans la conception des routes du futur, au sein de scenarios d'ensemble répondant aux enjeux de société, ce qui fait l'objet du projet Route 5ème Génération initié et piloté par l'Ifsttar (Hautière et al., 2013) et qui est discuté dans cet article.

Celui-ci est organisé de la façon suivante. Cet article vise tout d'abord à démontrer que malgré tous les progrès que peut réaliser l'industrie automobile, ces derniers, pour faire sens, nécessitent des infrastructures adaptées (I). Or, ce progrès en matière d'intelligence embarquée peut de manière paradoxale amener les gestionnaires routiers à se détourner des solutions routières innovantes (II). Pour équilibrer ce rapport de force, il y a nécessité de bâtir une vision commune (III). Malheureusement, les dispositifs d'innovation qui permettraient de l'évaluer semblent en panne (IV). Ainsi, il semble également opportun pour la route de se réinventer pour devenir le support de vecteurs de mobilité alternatifs à l'automobile individuelle (V).

Les solutions de « mobilité intelligente » ne feront sens qu'à condition que les infrastructures routières deviennent coopératives

Si la route est pointée du doigt, l'industrie automobile et des poids-lourds est également visée. Or, celle-ci est très réactive grâce à un investissement massif en matière de recherche et développement. Par conséquent, elle parvient à s'affranchir de normes environnementales drastiques adoptées régulièrement par les institutions de l'Union Européenne. L'ambition de celle-ci est de respecter les engagements internationaux sans infléchir la mobilité de ses citoyens (Jääskeläinen, 2013). Pour cela, elle mise avant tout sur les nouvelles technologies.

- *L'automatisation des véhicules routiers promet d'accroitre la capacité et la sécurité des réseaux routiers qui sont d'ores et déjà saturés tout en réduisant la consommation énergétique*

Depuis les années 1980 et le projet Prometheus, les constructeurs et équipementiers automobiles développent des systèmes d'assistances au conducteur, dont certains comme l'antiblocage des roues (ABS) et la correction de trajectoire (ESP) sont aujourd'hui obligatoires sur les véhicules neufs. S'appuyant sur des capteurs embarqués sur les véhicules qui permettent, après traitement des signaux et des images, de reconnaître l'environnement immédiat du véhicule, les systèmes qui commencent aujourd'hui à être commercialisés visent à freiner automatiquement les véhicules en cas de choc inévitable notamment avec des piétons, à gérer les interdistances avec les véhicules précédents et à maintenir les véhicules dans leur voie de circulation.

La fiabilité croissante de ces systèmes embarqués à courte portée a conduit l'industrie automobile à envisager l'automatisation des véhicules routiers. Le déploiement actuel des systèmes d'aide au stationnement constitue l'exemple le plus flagrant de cette tendance. A plus long terme, les constructeurs automobiles parient sur l'automatisation totale du véhicule, dont l'illustration la plus parfaite est celle des « Google Cars » aujourd'hui testées sur les routes du Nevada aux USA. Les niveaux d'automatisation les plus ambitieux consistent à libérer le conducteur de sa responsabilité et ainsi à s'affranchir de la convention de Vienne (SMART 2010/0064, 2011). Les chercheurs montrent ainsi en simulation qu'il est possible d'augmenter la capacité des routes, d'augmenter la sécurité et de diminuer la consommation des véhicules. L'enjeu majeur autour de ces différents systèmes est l'interaction homme-machine, notamment en cas de reprise en main nécessaire du véhicule par le conducteur. De nombreuses recherches sont donc en cours pour être en mesure de prédire l'état de vigilance du conducteur.

Néanmoins, les industriels restent limités par la précision des capteurs à grande distance, ce qui se traduit soit par des coûts prohibitifs, soit par des vitesses de fonctionnement peu élevées. Ainsi, le scénario d'usage prépondérant du concept de « véhicule autonome » est celui de la congestion récurrente en milieu péri-urbain dense. En étant débarrassé de sa tâche de conduite, le conducteur peut ainsi, au cours de son déplacement domicile-travail, commencer à travailler et ainsi redonner de la valeur au temps qu'il passe dans la circulation.

Pour élargir le spectre des scénarios d'usage de ces véhicules intelligents, il est nécessaire d'en augmenter la capacité d'anticipation. Ainsi, s'est développé plus récemment un autre concept qui est celui du véhicule communicant.

- *Le déploiement de véhicules communicants permet d'étendre la portée des capteurs embarqués sur les véhicules et par la même de sécuriser et fluidifier davantage le trafic routier*

La démocratisation puis l'avènement des télécommunication sans fil ont conduit l'industrie automobile à s'approprier ces technologies et à développer ce que la Commission Européenne appelle les systèmes coopératifs. Une première famille de solutions s'appuyant sur une bande de fréquence dédiée à 5,9 GHz permet d'échanger des informations à courte portée (typiquement quelques centaines de mètres) entre véhicules et entre véhicules et bord de voies. La nature des informations échangées porte sur l'état des véhicules et sur les données mesurées par les capteurs embarqués et permettent d'accroitre leur portée. Ainsi, ces systèmes permettent d'accroitre l'anticipation des véhicules et de détecter d'autres véhicules invisibles pour eux, notamment en intersection. Les protocoles de communication font l'objet de nombreux travaux mais en général ceux-ci ne garantissent pas la réception des informations de manière à minimiser la latence des systèmes.

Une deuxième famille de systèmes repose sur l'utilisation des communications cellulaires. Les informations échangées sont généralement moins riches. Néanmoins, on compte parmi celles-ci les informations primordiales que sont la position et la vitesse des véhicules. En recueillant ces simples informations, il est envisageable d'accroitre l'efficacité de la gestion du trafic, les données recueillies étant beaucoup plus riches que celles collectées par les boucles électromagnétiques des gestionnaires routiers. Ainsi, devant cette perspective de révolution en matière de gestion de trafic, de nouveaux acteurs, généralement privés, se sont lancés dans le guidage aux usagers. C'est ainsi que l'industrie des assistants personnels de navigation a décollé.

Le développement de ces systèmes coopératifs a nécessairement des conséquences en matière d'automatisation de la conduite. Certains projets, comme le projet Européen SARTRE, ont démontré qu'il était possible de créer et de gérer en toute sécurité à l'aide de ces technologies des pelotons de véhicules, notamment des poids-lourds, à vitesse normale et avec des interdistances réduites. Les enjeux majeurs autour des systèmes coopératifs restent aujourd'hui les questions d'interopérabilité, de normalisation et de certification.

- *La synergie réelle entre ces concepts nécessite néanmoins des infrastructures adaptées*

Les deux concepts présentés, à savoir le véhicule autonome et le véhicule communicant, sont complémentaires. Ils partagent les mêmes objectifs, à savoir l'accroissement de la sécurité, la diminution de la congestion routière et par la même la diminution de la consommation énergétique. Les domaines d'emploi ne sont pas les mêmes. Les véhicules autonomes sont plutôt utiles pour gérer les trafics d'ores et déjà saturés, tandis que les systèmes coopératifs permettent de fluidifier les trafics non encore saturés. Ces concepts peuvent en théorie se passer d'une coopération avec les infrastructures.

Cependant, pour réellement maitriser la congestion routière et envisager un trafic entièrement automatisé, le rôle des infrastructures demeure central, voire primordial (Blosseville et al., 2001). Suite aux différents projets intégrés financés par la Commission Européenne, on commence ainsi à pouvoir lister précisément les requis de ces systèmes en matière d'équipement des infrastructures. Une telle approche intégrée nécessite des infrastructures de communication sécurisées réparties le long des infrastructures, des systèmes d'information géographique plus précis et mieux renseignés par les gestionnaires routiers notamment en matière de fermeture temporaire de voies, des marquages routiers bien entretenus pour faciliter la reconnaissance optique des voies par les capteurs des véhicules et enfin des capteurs redondants et précis pour fiabiliser les capteurs bas coûts embarqués dans les véhicules.

Les concepts développés par l'industrie automobile et promus par la Commission Européenne visent à accroitre l'efficacité et la sécurité du trafic automobile. Cependant, les travaux académiques en la matière montrent que des gains significatifs ne peuvent être atteints qu'en concevant des infrastructures routières coopératives.

La promesse de véhicules intelligents peut pourtant amener les gestionnaires routiers à se détourner des solutions technologiques routières innovantes

- *La modernisation et la régénération routières doivent-elle se faire à niveau de service constant ?*

Le rapport de la commission Mobilité 21 rendu en juin 2013 a confirmé le changement de paradigme entamé en 2007 avec la disparition du Ministère de l'Equipement (Duron, 2013). Le réseau routier français est suffisamment étoffé et il convient de se concentrer aujourd'hui sur son entretien. A l'instar de la rénovation urbaine, la route doit apprendre à se renouveler sur elle-même. La question qu'il convient de se poser est de savoir quelle forme ce renouvellement doit prendre. Les programmes de modernisation

et de régénération routières doivent-ils se faire à niveau de service constant selon des techniques routières éprouvées ou la route doit-elle se renouveler de manière plus respectueuse de l'environnement en introduisant de nouveaux services aux usagers ? En effet, les routes peuvent être régénérées en économisant les ressources naturelles, à partir de matériaux plus endurant aux effets du trafic et du climat, et de techniques s'intégrant dans des démarches de développement durable. Encore faut-il laisser une chance à ces inventions pour les transformer en de véritables innovations.

- *Des procédés de construction potentiellement plus économes en ressources naturelles*

Pour optimiser l'usage des ressources naturelles, une première stratégie consiste à recycler les matériaux en place ou à employer seuls ou en ajout de matériaux routiers neufs, les nombreuses sources de matériaux alternatifs tels que mâchefers ou certains produits usagers (ex : pneus), matériaux de déconstruction, coproduits industriels, etc. Le procédé permet donc de diminuer dans le même temps les mises en décharge de matériaux ultimes. L'utilisation de ressources locales permet en outre de limiter les transports de matériaux liés aux chantiers routiers eux-mêmes.

Les techniques de recyclage ou de réemploi de matériaux connaissent des développements depuis plus d'un siècle. Aujourd'hui, leur maîtrise s'est encore accrue grâce à de meilleurs procédés de sélection et de tri des matériaux à réutiliser , une meilleure prise en compte de leurs cycles de vie et la mise au point de méthodes d'étude permettant d'évaluer et d'optimiser leur comportement au sein des corps de chaussée. Certaines de ces techniques se révèlent à l'usage multiplement vertueuses. L'Ifsttar a ainsi pu récemment démontrer que l'exposition à l'air libre des bétons de déconstruction avant réemploi permettait de piéger une partie du CO_2 de l'atmosphère. Utilisées en couche de surface, les poudrettes de caoutchouc obtenues par broyage des pneus usagers permettent quant à elles d'absorber une partie du bruit de trafic.

Une autre voie d'économie de matériaux consiste à développer des matériaux très résistants au trafic et aux agressions climatiques permettant d'envisager des routes dites « perpétuelles », aussi bien en ce qui concerne les propriétés de portance que les propriétés de surface (OCDE, 2008). Les enrobés à base de bitume-époxy, déjà employés comme revêtement sur les tabliers de ponts en acier ou en zones de virage sur autoroute en fournissent un exemple. Leur généralisation sur certains tronçons routiers particulièrement chargés est envisageable. Plus récemment, l'Ifsttar a développé dans le cadre d'un projet de recherche européen, un enduit hydraulique fibré gravillonné pour revêtement de chaussée, garantissant des propriétés de surface à longue durée de vie de l'ordre de trente ans au lieu de dix actuellement. Bien que trois fois plus chères, ces techniques permettent d'espacer les opérations de maintenance, particulièrement sur les réseaux périurbains très denses, où elles occasionnent de nombreux retards et gênes aux usagers ou riverains.

Une autre voie plus prospective consiste à augmenter la durée de vie des techniques existantes en développant des matériaux autoréparables. L'une de celle-ci repose sur le caractère auto-cicatrisant du bitume, produit issu de la distillation des pétroles bruts, et consiste à inclure des microcapsules de bitume frais. Sous le poids des charges roulantes en particulier des poids-lourds, celles-ci vont progressivement éclater, libérant ainsi le bitume et rajeunissant le matériau, de façon à lui permettre de conserver sa souplesse dans le temps. D'autres travaux de recherche montrent que l'utilisation de chaines polymères spécifiques pourrait augmenter le pouvoir d'autoréparation des liants routiers. Une autre solution consiste à inclure des fibres métalliques dans le béton bitumineux de façon à le rendre conducteur électriquement Il suffit ensuite de chauffer le matériau par induction à l'aide d'un appareil dédié pour permettre de refermer les fissures et de prolonger la durée de vie de la chaussée.

- *Des procédés de construction induisant potentiellement moins d'impact sur l'environnement*

A côté des efforts entrepris pour économiser les ressources naturelles, l'industrie routière fait en sorte de développer des techniques qui minimisent les impacts environnementaux liés à la construction et l'entretien des routes ou au trafic. C'est ainsi que de nombreux procédés d'enrobés tièdes ont vu le jour au cours des dernières décennies. Ceux-ci permettent de fabriquer et mettre en œuvre les enrobés à des températures plus faibles qu'auparavant générant moins d'émissions de fumées sur chantiers.

En milieu urbain et périurbain, les ingénieurs conçoivent des chaussées moins bruyantes, impactant moins les populations riveraines Plusieurs techniques permettent aujourd'hui de réduire le bruit à la source, c'est-à-dire au niveau du contact-pneu chaussée, majoritaire aux basses vitesses par rapport au bruit des moteurs et qui demain pourrait constituer la source prépondérante de bruit avec le développement des véhicules électriques. Les enrobés drainants, introduits dans les années 70/80 et principalement développés pour diminuer les projections d'eau par temps de pluie constituent une première solution. Obtenus par mélange de granulats de grande et petite tailles, évitant les classes de

granulats de taille intermédiaire, ces matériaux à fortes porosité et perméabilité permettent en effet de limiter également les surpressions d'air créées entre le pneu et la chaussée, qui contribuent pour grande part à la génération du bruit de roulement. Des variantes plus récentes de cette technique, basées sur l'empilement de couches drainantes possédant des tailles de vides distinctes, permettent de palier la fragilité relative des premières générations de matériaux. Dans le même ordre d'idée, les Pays-Bas testent également des structures de chaussée incluant en partie haute des cavités préfabriquées (résonateurs de Helmholtz) de grandeur décimétrique, conçues pour absorber les fréquences sonores caractéristiques du bruit de roulement. Une autre solution qui tend à se généraliser consiste simplement à réaliser des revêtements avec des granulats de petits diamètres par rapport à ceux utilisés précédemment (typiquement de l'ordre de 6 mm au lieu de 14) permettant de réduire les vibrations acoustiques générées au contact pneu-chaussée, sans détériorer pour autant les propriétés d'adhérence, ni de drainabilité indispensables en surface de chaussée. L'incorporation de caoutchouc, issu notamment du recyclage de pneumatiques usagés et conditionné sous forme de granulats ou de poudre additionnée au bitume, permet encore de gagner quelques décibels sur l'efficacité acoustique de ces matériaux. Enfin, des murs anti-bruit de nouvelle génération à la structure fractale se développent pour éliminer le bruit résiduel qui n'aurait pas encore été éliminé à la source.

Les chaussées, comme du reste les surfaces verticales des bâtiments dans les villes, pourraient également être susceptibles de contribuer à la dégradation des polluants contenus dans l'atmosphère. C'est ce que permet aujourd'hui la technologie de photo-catalyse par dioxyde de titane, TiO_2, incorporé dans les matériaux de construction. Sous l'effet des rayons ultra-violets émis par la lumière solaire, ces matériaux permettent de réduire les dioxydes d'azote nocifs pour la santé et de diminuer les facteurs de création d'ozone, dommageables pour l'atmosphère.

On peut imaginer de même, par un choix adéquat des revêtements, faire jouer aux chaussées un rôle de régulateur thermique dans les villes. Grace à leur forte porosité remplie d'air, les enrobés drainants, peuvent être utilisés comme isolant, afin d'empêcher le stockage de chaleur dans les sols urbains. Le choix de granulats clairs peut non seulement rafraichir le climat urbain en période estivale en contribuant à la diminution de l'albédo de la ville, mais également diminuer la puissance nécessaire de l'éclairage public pour un même niveau de confort visuel offert aux usagers.

- *Des routes endurantes aux changements climatiques et atténuatrices de leurs effets*

Les scénarios de changement climatique envisagent une augmentation de la fréquence et de l'intensité des évènements météorologiques extrêmes tels que tempêtes, grands froids, canicule,… Les infrastructures routières de demain devront donc pouvoir non seulement résister à des amplitudes de température ou précipitations plus élevées, mais également participer, parmi d'autres mesures, à la régulation du cortège de menaces accrues que font peser de telles évolutions climatiques : crues-éclairs, glissements de terrain,…

Face au risque d'inondation, des techniques ont été développées en milieu urbain pour remplacer les surfaces bitumées imperméables (rues, parking,…) en structures de chaussées absorbantes, capables d'écrêter les crues. Basées sur l'emploi de matériaux drainants en surface et dans leur épaisseur, elles stockent temporairement les eaux pluviales, afin de ralentir et réguler les débits vers le réseau collecteur des villes. Une contribution encore plus intégrée de ces chaussées à la gestion des eaux pluviales, dans lesquelles elles joueraient un rôle de filtration et d'épuration est imaginable. En bordure de fleuve ou de mer, l'homme a de longue date construit des routes-digues pour à la fois se déplacer et contenir les masses d'eau. La nouvelle route en cours de construction, du Littoral de l'Ile de la Réunion, version modernisée de la route-digue, vise à protéger aussi bien de la houle que des éboulements naturels des falaises, à l'aide d'un piège à cailloux. Cette nouvelle route sera en outre dotée d'un site propre pour transports collectifs. Le tout permettra une mobilité plus sûre et plus efficace des habitants de l'île.

- *Des routes préfabriquées à la fois adaptables et furtives*

La complexification des demandes pour des routes à la fois pluri-fonctionnelles, fiables, peu émissives, résilientes au changement climatique, peut nécessiter pour partie, sur des linéaires limités, la préfabrication d'éléments de chaussée en usine. Ceux-ci intégrent dans leur épaisseur les réservations nécessaires au passage des différents réseaux d'énergie ou d'information. La mise au point de procédés de pose rapide permet alors de limiter la durée des chantiers de construction, tandis que les possibilités de démontage autorisent un remplacement aisé des éléments défectueux ou donnent facilement accès aux réseaux placés en sous-sol.

Le procédé est d'ores et déjà utilisé pour le traitement de certaines intersections de rues et voies de tramways. Au Pays-Bas, une section autoroutière de l'A12 a été réalisée en 2006, sous forme de chaussée modulaire (ModieSlab) reposant sur des fondations à base de pieux. Celle-ci permet de franchir des zones à sols très compressibles, à la façon d'un petit ouvrage d'art. En France, deux sections expérimentales de « Chaussée Urbaine Démontable » situées, l'une à Saint-Aubin Lès Elbeuf, près de Rouen, l'autre à Nantes démontrent la capacité à construire des chaussées pouvant être rapidement et facilement ouverte et refermée, à l'aide d'un matériel léger et silencieux, afin de réduire la gêne aux usagers et riverains occasionnée par les travaux d'entretien des réseaux en sous-sol.

- *Le déploiement des technologies de l'information et de la communication est au cœur des enjeux de la route de demain*

Les routes peuvent également tirer partie des technologies de l'information et de la communication, notamment pour optimiser les intervalles d'entretien. Les industriels routiers en association avec l'Ifsttar ont ainsi conçu des instrumentations innovantes permettant d'enregistrer dans la durée les paramètres mécaniques de la chaussée à l'aide de capteurs intégrés dans la structure de la chaussée. Reliés à des serveurs, ces instruments permettront à terme de prédire les déformations des chaussées et de procéder à des opérations de maintenance préventive (Sohm et al., 2012). Encore plus ambitieux, l'Ifsttar développe des matériaux « intelligents » à base de nanotechnologies qui intégreront des capacités de mesure, de calcul, de communication et collecte d'énergie. Ces travaux font l'objet du projet SenseCity sélectionné par l'ANR dans le cadre du programme Equipements d'Excellence des Investissements d'Avenir (Lebental et al., 2012).

Malheureusement, les gestionnaires routiers voient plutôt dans les technologies de l'information et de la communication un moyen de déporter l'intelligence des infrastructures vers les véhicules, et par la même occasion de transférer les coûts vers l'usager de la route. Dans un contexte de difficultés budgétaires, il semblerait que les gestionnaires aient du mal à percevoir les enjeux de redondance des capteurs sur l'infrastructure. Par exemple, les gestionnaires voient dans les smartphones un substitut efficace aux boucles électromagnétiques qu'il faut refaire à chaque fois que la couche de roulement est renouvelée.

Ainsi, devant la promesse de véhicules autonomes et communicants, les gestionnaires routiers adoptent une position attentiste et ne perçoivent dans ces technologies qu'un moyen d'optimiser leurs coûts d'entretien. Or, comme on l'a vu précédemment, l'infrastructure doit au contraire s'équiper davantage pour tirer parti de ces nouvelles générations de véhicules. Dans ces conditions, on voit mal comment les programmes de régénération routière, sans contraintes extérieures, pourraient conduire à accroître le niveau de services des réseaux routiers et s'intégrer dans des démarches de développement durable.

Le développement d'une cinquième génération de route s'avère pourtant nécessaire pour optimiser le niveau de service des infrastructures de demain

L'industrie automobile attend des gestionnaires routiers qu'ils adaptent leurs infrastructures en adéquation avec leurs concepts. Inversement, ces mêmes gestionnaires entendent moderniser leurs infrastructures en tirant partie de ces véhicules modernes plutôt qu'en investissant dans des solutions routières innovantes. Il semble donc urgent de trouver un équilibre entre les différentes attentes.

- *Il a semblé nécessaire de bâtir une vision intégrée des routes de demain qui soit davantage partagée entre l'ensemble des parties prenantes*

Pour tirer le meilleur parti des savoir-faire actuels en matière de mobilité intelligente et de technologies routières, une vision intégrée des routes de demain est nécessaire. Une telle ambition ne pouvait être envisagée qu'à l'échelle européenne. Le projet a donc fait l'objet d'une réflexion portée par plusieurs laboratoires européens, dont le TRL (Royaume-Uni), la Bast (Allemagne), le DVS (Pays-Bas), le DRI (Danemark), l'AIT (Autriche) et l'Ifsttar en France. Une alliance Européenne s'est ainsi constituée autour du programme « Forever open Road » (FOR) piloté par le FEHRL (association européenne des instituts de recherche en génie civil) (Lamb et al., 2012).

Le programme FOR s'attache ainsi à inscrire les problématiques d'infrastructures routières dans les agendas de recherche de la Commission Européenne, notamment via le Programme Cadre de Recherche et Développement HORIZON 2020 (2014-2020), qui se construit notamment à travers différentes plates-formes technologiques, notamment ERTRAC (European Road Transport Research Advisory Council), ECTP (European Construction Technology) et ERTICO (ITS Europe). Cela se concrétise notamment par la publication en janvier 2013 de trois feuilles de route complémentaires à même d'alimenter les appels à projet de la Commission Européenne dans les années à venir.

Pour que les intérêts des industries routière et automobile convergent, il leur faut néanmoins des objectifs communs. La transition énergétique du transport routier pourrait être cet objectif, notamment l'électrification du parc de véhicules.

- *La route pourrait devenir son propre fournisseur d'énergie*

Par la surface qu'elles occupent, emprises et espace circulés compris, les routes représentent une importante source potentielle d'énergie solaire, susceptible pour une part d'alimenter leurs propres équipements et pour le reste d'alimenter les réseaux de distribution électriques. Plusieurs techniques de captage des photons arrivant en surface des routes sont d'ores et déjà testées.

En Bavière, une usine photovoltaïque d'1 MW a été installée le long de l'autoroute A94 en exploitant les pentes des déblais autoroutiers, évitant de la sorte tout conflit d'usage des terres agricoles. De façon plus novatrice, l'espace circulé lui-même peut être recouvert de panneaux photovoltaïques. Dans le cadre du projet SolaRoad, le TNO (Organisation Néerlandaise pour la Recherche Scientifique appliquée), a ainsi conçu un panneau constitué d'un centimètre d'épaisseur de cellules photovoltaïques en silicium cristallin, recouvertes d'une couche de verre trempé et rugueuse pour assurer un bon niveau d'adhérence. Ce procédé permettrait de produire selon leurs concepteurs 50 kWh par m^2. Le déploiement est progressif et concerne pour l'instant les pistes cyclables très nombreuses aux Pays-Bas. Pour ce faire, un site pilote de 100 m de long par 4 m de large est en cours de réalisation dans la ville de Krommenie. Cette première phase du projet, prévue sur une durée de cinq ans, est destinée à mieux appréhender la gestion technique et la rentabilisation de telles installations ; comment stocker le surplus d'énergie produit en période d'ensoleillement, comment le redistribuer, etc.

L'architecte suédois Mans Tham imagine quant à lui de transformer les autoroutes de Los Angeles en usine électrique, en les couvrant d'un toit de panneaux photovoltaïques fixés sur un châssis en treillis. La solution permet en outre de contenir le bruit routier, de protéger les chaussées des intempéries et d'augmenter leur durabilité des chaussées et de diminuer l'usage des climatisations à bord des véhicules en plaçant celles-ci à l'ombre. L'autoroute de Santa Monica, à Los Angeles (24 km de long sur 40 m de large) pourrait ainsi recevoir 600 000 m^2 de panneaux, de quoi offrir une puissance maximale de 115 MW (soit 12 % de la puissance d'une tranche de centrale nucléaire française) et produire 150 GWh d'électricité par an.

Ces idées bénéficieront du progrès même des technologies photovoltaïques, qui visent à simplifier l'usage de cette source d'énergie et à en diminuer le coût. C'est ainsi que certains laboratoires travaillent sur la mise au point d'encres photovoltaïques, permettant d'imprimer des piles solaires à bas coût, sur supports souples au moyen de presses rotatives. Même si le rendement de ces « tissus » voltaïques ne peut encore rivaliser avec celui des panneaux photovoltaïques traditionnels, il est fort à parier que leur facilité d'emploi, alliée à des prix très abordables, trouvera de nombreuses applications, y compris dans le domaine des infrastructures routières, par exemple pour alimenter les équipements de bord de voie. Ainsi, Van Damme (2012) estime que si l'on couvre les 10 000 km du Réseau Routier National français avec des panneaux à rendement à 10 % on obtient deux tiers de la production du parc nucléaire français, soit environ 50% de la production électrique totale en France.

- *La route vectrice d'énergie électrique*

Les transports routiers sont de grands consommateurs d'énergie fossile et diverses solutions sont en cours de déploiement ou d'étude pour transformer les voitures et poids lourds, en véhicules décarbonés. La route ne peut rester en dehors de ces profonds changements. Elle doit non seulement s'y adapter, mais aussi être pensée comme partie intégrante de nouvelles boucles d'énergie infrastructures-véhicules.

Pour les voitures électriques, le recours à des bornes de recharge individuelles (à domicile) ou collectives (dans la rue) est actuellement privilégié, comme le montre les services de flotte électrique en cours de déploiement. Dans ce cas, c'est l'usager qui branche lui-même son véhicule à la borne, ce qui n'est pas sans poser des problèmes de sécurité et de commodité. D'autres solutions sont en cours d'étude telle que le « biberonnage » développé pour connecter automatiquement et physiquement les véhicules électriques aux bornes électriques. Une telle station expérimentale existe dans le XVIème arrondissement de Paris depuis janvier 2012. Une autre voie possible consiste à délivrer sans contact l'énergie électrique. Différentes technologies sont à l'étude, dont la transmission d'énergie par couplage inductif électromagnétique et la transmission d'énergie par couplage inductif par résonance.

Mais devant les difficultés à stocker l'énergie électrique à bord des véhicules, l'enjeu est aussi de passer de la recharge statique à la recharge en mouvement. Non pas sur la totalité des routes et de leurs tracés, mais sur certains segments plus stratégiques ou énergivores, comme la périphérie des grandes villes ou les

longues sections autoroutières en montée. Différentes expérimentations sont en cours, s'inspirant pour certaines d'entre elles des technologies parfois anciennes, utilisées pour les transports collectifs.

Siemens expérimente ainsi l'adaptation du système de caténaires des trolleybus (dont les premiers exemplaires datent de 1882), pour la recharge de poids-lourds hybrides à propulsion électrique et thermique diésel. L'alimentation par le sol ou APS, développée par Alstom dans la fin des années 1990, pour les tramways (ex : en centre-ville de Bordeaux), apparait comme une autre méthode possible, moins intrusive pour l'Environnement et les paysages. Elle consiste en l'implantation d'un rail conducteur en milieu de voie, le tramway étant muni de « frotteurs ». Le rail d'alimentation est segmenté en tronçons, actifs uniquement lorsqu'entièrement recouverts par le tram, afin d'éviter tout risque d'électrocution pour les autres usagers (piétons, cycles, motocyles). De son côté, Bombardier a montré qu'il était possible d'alimenter en marche des tramways sans contact par couplage inductif. L'expérimentation Coréenne « OLEV » montre qu'il est possible de transposer le principe à la route. Basé sur des dispositifs de recharge, enfouis dans la chaussée, le système coréen permet de faire circuler des véhicules avec un rendement supérieur à 80 % et une garde au sol supérieure à 15 cm. Il est d'ores et déjà exploité dans un parc d'attraction pour faire circuler des véhicules touristiques. Mais l'alimentation sans contact d'un flux continu de véhicules dont les déplacements sont moins contraints et donc moins prévisibles, reste un enjeu de recherche pour les années à venir. En l'occurrence, le projet Européen FABRIC, qui associe pour la première fois constructeurs automobiles et experts en construction routière sous l'égide de l'IEED Védécom, vient d'être sélectionné par la Commission Européenne pour prototyper de tels systèmes de recharge en mouvement à vitesse plus élevée, dont un exemplaire devrait être réalisé au sein de l'Ifsttar.

- *Le projet R5G vise à évaluer le niveau de service de cette route de nouvelle génération à la fois évolutive, coopérative et à contribution environnementale positive*

Pour rendre visible la recherche et l'innovation dans le domaine routier, l'Ifsttar a lancé en 2010 le projet R5G. Initialement inscrit dans le contrat d'objectifs 2010-2013 signé entre le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées et l'Etat, le projet fait aujourd'hui partie des quatre grands projets fédérateurs de l'Ifsttar. Celui-ci vise la création de démonstrateurs de recherche au plan national et international. En effet, un « démonstrateur » constitue selon l'Ademe (Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie) une étape du processus de recherche-développement-industrialisation de technologies qui se situe juste avant la phase d'industrialisation et qui peut conduire à relancer des recherches appliquées au terme de l'expérimentation du démonstrateur (pour optimiser des technologies ou lever certains verrous économiques ou sociétaux).

Situé entre le laboratoire et l'expérimentation en vraie grandeur, le démonstrateur de recherche constitue l'outil à privilégier pour évaluer les routes de cinquième génération, en coopération étroite entre les entreprises privées et les laboratoires publics. Ces sites en vraie grandeur et sur route ouverte accéléreront l'évaluation des solutions disponibles dans les laboratoires et permettront d'identifier les plus prometteuses d'entre elles.

Le projet R5G comporte en théorie trois phases. Une première étape, en cours à l'heure actuelle, consiste à tester et à labelliser des techniques spécifiques dans des démonstrateurs spécifiques sur piste ou en laboratoire. Une deuxième étape consiste à intégrer certaines de ces innovations dans des démonstrateurs thématiques et à identifier les problèmes de mise en œuvre. Ces démonstrateurs thématiques ne sont plus nécessairement liés à des techniques routières mais répondant à un enjeu de mobilité. Une troisième étape consistera à coupler l'ensemble des innovations, par fertilisation croisée des démonstrateurs thématiques, de façon à évaluer la synergie entre ces innovations pour répondre aux enjeux sociétaux en matière de mobilité (Sellam et Basset, 2012). Cependant, le passage de la première à la deuxième phase semble délicat à cause d'une chaine d'innovation qui tend à se rompre.

La gouvernance de la transition vers cette Route de 5ème Génération peine à se concrétiser

Le passage du laboratoire au terrain passe par des mécanismes d'expérimentation et d'essai en vraie grandeur que l'on désigne généralement sous le terme d'innovation. Or, les dispositifs d'innovation routière existant semblent s'essouffler et les solutions de substitution pertinentes ne sont pas adaptées à l'ensemble des réseaux routiers.

- *Les dispositifs d'innovation routière s'essoufflent les uns après les autres et les Investissements d'Avenir ne se sont pas (encore) intéressés à la route*

Le rapport Ray et Fougea (2004) témoignait déjà d'une perte d'efficacité du dispositif des chantiers expérimentaux. Le dispositif avait donc a dû être révisé, notamment pour se conformer au code des marchés publics (SETRA, 2006). Désormais, les innovations routières sont encadrées par l'article 75 du

code des marchés publics. Ce dispositif révisé a pour conséquence une prise de risque moindre des maîtres d'ouvrage, la charte stipulant que les solutions proposées doivent avoir prouvé leur fiabilité au préalable, et au contraire une prise de risque (théorique) maximale de la part des entreprises. Dans les faits, étant donné l'exposition médiatique de la charte, un échec aurait des répercussions trop importantes, si bien que les entreprises tardent à faire concourir leurs innovations. A contrario, les maîtres d'ouvrage des collectivités territoriales, devenus les principaux donneurs d'ordre, développent des chartes d'innovation locales car leurs besoins en termes d'innovation sont importants. Cependant, il est difficile de capitaliser les pratiques innovantes d'une collectivité à l'autre car celles-ci sont hétérogènes.

Ainsi, en même temps qu'il a réduit son rôle d'opérateur, l'Etat a progressivement perdu son rôle d'assureur. Pourtant, la croissance de notre économie développée dépend fortement de l'innovation (Blanc, 2004). C'est en partie pour se substituer à son rôle d'opérateur, que l'Etat, devenu stratège, a mis en place les pôles de compétitivité en 2005 et que le programme Investissements d'Avenir a été initié en 2010. Malheureusement, le volet transport de ce dernier s'est uniquement concentré sur le développement de nouveaux véhicules, oubliant au passage les infrastructures de mobilité, à l'exception notable de l'appel à manifestation d'intérêt sur l'expérimentation des infrastructures de recharges pour véhicules électriques.

- *Les Directives Européennes tout comme les contrats de partenariat public privé ne peuvent concerner l'ensemble des réseaux routiers*

La transposition des directives concernant le réseau routier transeuropéen est un moyen pour la Commission Européenne d'appliquer sa stratégie. Ainsi, les directives Inspire (2007), Sécurité des infrastructures (2008) et ITS (2010) vont permettre d'améliorer la sécurité routière et de déployer certains services de transports intelligents sur ces réseaux prioritaires pour la libre circulation des biens et des personnes sur le vieux continent. Néanmoins, cela ne peut concerner l'ensemble du territoire. De même, les contrats de partenariat, qui permettent de transférer au titulaire du contrat les risques, permettent à ce dernier d'innover, ce qui tend à optimiser le niveau de services des infrastructures (Iossa et al., 2008). Ainsi, le groupe Colas, dans le cadre de sa concession de l'A63, innove davantage, notamment avec l'Ifsttar, pour optimiser l'entretien du patrimoine routier, qui au terme du contrat reviendra à l'Etat.

- *La normalisation et la réglementation ne peuvent suffire et peuvent en l'absence de dispositif d'innovation efficace s'avérer coercitives*

L'article de Starkl et Brunner (2004) décrit la complexité du jeu d'acteurs qui est à l'œuvre pour sélectionner une technologie de traitement d'eaux usées, l'enjeu étant le coût versus la durabilité des solutions envisagées. La réglementation est là pour rejeter les solutions les moins chères car moins efficaces au plan environnemental. Le coût d'investissement constitue également le frein à l'introduction des techniques les plus innovantes au plan environnemental. Outre le coût initial, le risque projet est plus élevé pour les technologies innovantes, ce qui les empêche d'être retenues à cause de l'aversion au risque légitime des maîtres d'ouvrage.

Ainsi, il n'existe pas, à l'instar de la réglementation pour les solutions dépassées, d'outil à même de favoriser les technologies innovantes. L'introduction d'un bonus écologique est susceptible de créer une telle dynamique. D'un point de vue théorique, ce bonus est à mettre en rapport d'une part avec la prime de risque que le maître d'ouvrage est susceptible de demander en échange de la mise en œuvre de la dite technologie innovante et d'autre part avec la valeur d'option que la puissance publique attache aux bénéfices environnementaux à long terme que cette technologie est susceptible de générer (Baudry, 2000). Une tentative de représentation graphique de ces différents concepts est proposée sur la Figure 1. L'aire colorée en rouge schématise en particulier l'incertitude associée aux technologies innovantes.

Dans le domaine routier, si les chartes d'innovation s'essoufflent, la normalisation et la réglementation dans le domaine routier n'ont pas diminué, notamment au plan environnemental. Comme il n'existe pas de dispositif permettant de couvrir la prime de risque des maîtres d'ouvrage, ces outils deviennent plutôt des freins à l'innovation voire des outils coercitifs.

- *Le renouveau de l'innovation routière pourrait passer par un opérateur dédié au pilotage et la mise en œuvre d'une politique nationale de régénération routière*

Dans ces conditions, comment gouverner la transition vers des routes de nouvelle génération et en particulier comment assurer leur transition énergétique. Dans le cadre du débat national sur la transition énergétique dans les transports, le Conseil Economique, Social et Environnemental (Duchemin et Genest,

2013) a émis la proposition que ce soit l'Agence de Financement des Infrastructures de Transports en France (AFITF), avec un soutien financier de l'État, et selon la logique mise en œuvre pour la rénovation urbaine avec le Programme National de Rénovation urbaine qui pilote et mette en œuvre cette politique nationale de régénération routière : « avec une gouvernance rénovée à l'instar de l'Agence Nationale pour la Rénovation Urbaine (ANRU), il pourrait être envisagé que l'AFITF joue ce rôle en tant qu'Agence nationale des nouvelles mobilités. » Disposant potentiellement d'une nouvelle source de financement que constitue l'écotaxe, ce scénario, en droite ligne avec le rapport de la Commission Mobilité 21 (Duron, 2013), apparaît comme pertinent à condition qu'un mécanisme d'innovation soit inscrit dans cet éventuel programme, comme cela devrait être également le cas pour le Nouveau PNRU qui devrait être voté d'ici la fin de l'année (ANRU, 2013).

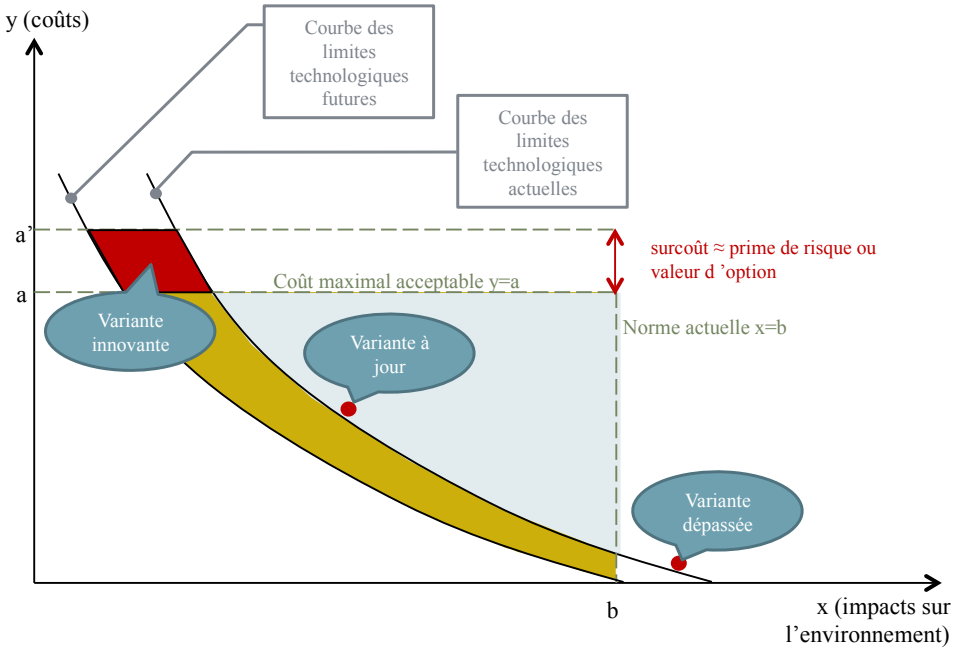

Figure 1. Modélisation inspirée de Starkl et Brunner (2004) du processus de sélection d'une technologie selon des considérations de coût et de durabilité.

La route doit également se réinventer pour être le support des modes de déplacement alternatifs à l'automobile

Comme vu précédemment, la transition vers les routes de cinquième génération est loin d'être acquise. En cas d'échec de cette transition de la mobilité individuelle, les routes devront s'adapter pour supporter de nouvelles formes de mobilité alternatives à l'automobile individuelle.

- *Des alternatives à l'automobile et aux transports en commun de masse se développent essentiellement en milieu urbain*

Les comportements évoluent et certains pensent que la mobilité en milieu urbain a atteint son paroxysme, voire décline dans certains pays développés (Goodwin, 2012). Ainsi, le modèle dominant jusqu'à présent de la voiture individuelle pourrait peut-être évolué vers une société de transport à la demande, dont les flottes de véhicules en libre service et les services d'auto-partage actuels ne sont que les prémices. Ce que l'on appelle le troisième mode de transport permet ainsi de faire le lien entre les transports en commun et l'automobile individuelle. L'IEED Védécom, qui se met en place, a vocation à se consacrer à cette problématique. D'autres acteurs académiques et industriels travaillent sur les transports automatisés du futur et envisagent plutôt un rapprochement entre les transports automatisés et l'automatisation des véhicules routiers. C'est la notion connue en France sous le nom de cybercar. Dans les deux cas, il faut songer aux formes nouvelles que prendront alors les infrastructures qui supporteront ces nouveaux vecteurs de mobilité et en permettront l'homologation, à l'instar des projets Européens Citymobil 1 et 2. Les véhicules étant pensés en adéquation avec les infrastructures, il devrait en résulter une plus grande liberté dans la conception de ces nouvelles infrastructures, comme cela est déjà le cas pour les voies dédiées de certains bus à haut niveau de service (Chan et Zhang, 2013). Ainsi, dans ce scénario, on peut aisément imaginer que le nombre de véhicules devrait diminuer et permettre de résoudre la difficile équation de l'entretien des réseaux routiers en milieu urbain et péri-urbain.

- *L'avenir des réseaux locaux semble néanmoins très incertain, ce qui est de nature à impacter profondément l'aménagement des territoires*

Si la transition en milieu urbain semble imaginable dans le scénario d'une disparition des véhicules individuels, la transition des réseaux routiers locaux en milieu rural semble plus délicate. Continuer à entretenir ce long linéaire routier semble aujourd'hui un objectif peu réaliste. Aujourd'hui, deux tiers des tués le sont sur ces réseaux. Ainsi, il semblerait que certaines collectivités locales aient commencé à fermer certaines routes. On pourrait ainsi assister au même phénomène des réseaux ferroviaires, qui après une apogée du nombre de kilomètres exploités dans les années 40 ont commencé à voir leur linéaire s'effriter inexorablement, comme cela est schématisé sur la Figure 3 reprise de Didier et Prud'Homme (2007).

Conclusion

La part modale de la route dans les transports de biens et de personnes est ultra-majoritaire. Face aux critiques, la route se devrait d'innover davantage et s'approprier davantage les apports des nouvelles technologies, notamment pour tirer le meilleur parti des véhicules routiers à venir qui seront automatisés et connectés. Cependant, ce mouvement vers une mobilité plus intelligente ne doit pas se faire au détriment des solutions routières disponibles dans les laboratoires qui sont susceptibles de contribuer de manière substantielle à la transition énergétique de la route. Malheureusement, en l'absence d'une chaîne d'innovation efficace, les maîtres d'ouvrage routiers, morcelés sur l'ensemble du territoire, ne peuvent seuls entamer cette transition qui comporte de nombreux risques. L'ensemble de ces éléments milite ainsi pour la mise en place d'une politique nationale de régénération routière innovante pilotée et mise en œuvre par un opérateur unique, dont le projet R5G se veut constituer le volet recherche. La forme que prendront ces routes de nouvelle génération reste cependant incertaine, notamment en milieu rural.

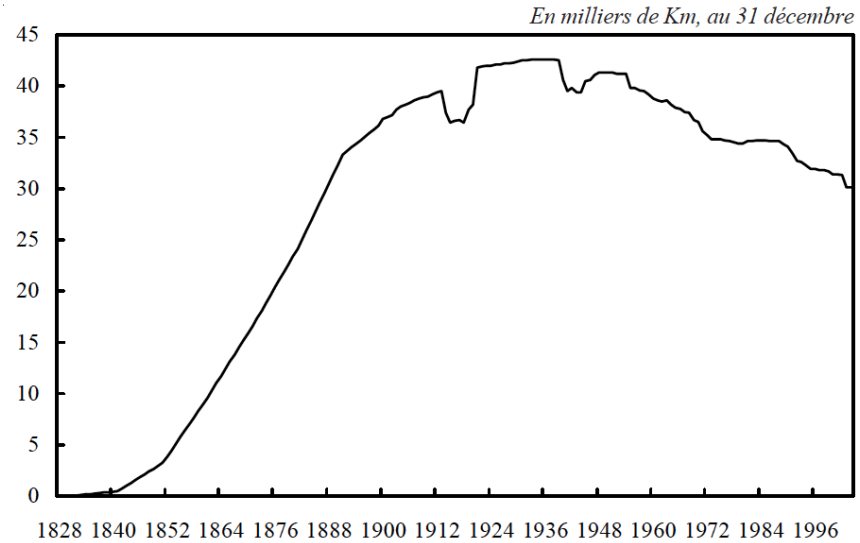

Figure 2. Longueur totale des lignes ferroviaires exploitées en France. Figure reprise de Didier et Prud'homme (2007).

Références

- ANRU (2013). Programme Investir pour la France : l'ANRU se réjouit des annonces du Premier Ministre. Communiqué de presse.
- Baudry, M. (2000). Le modèle de préservation de l'environnement de Arrow et Fischer : une approche en terme d'options réelles. Analyses d'économie et de statistique. N°57, pages 1-24
- Blanc, C. (2004). Pour un écosystème de la croissance. Rapport à l'assemblée nationale.
- Blosseville, J.-M. et al. (2001). La Route Automatisée : un scénario péri-urbain
- Blosseville, J.-M. et Salini, P. (2004). La RAPL ou route automatisée poids lourds : une autoroute "boostée". Solutions transport, N°36
- CGEDD (2013). Le facteur 4 en France : la division par 4 des émissions de gaz à effet de serre à l'horizon 2050, Rapport n° 8378-1
- Chan, C.-Y. et Zhang, W.-B. (2012). Field Operational Tests of Vehicle Assist and Automation Technologies. 5th National BRT Conference, Las Vegas, Nevada, USA
- Didier, M. et Prud'homme, R. (2007). Infrastructures de transport, mobilité et croissance. Conseil d'Analyse Economique. La Documentation Française

- Duchemin, B., Genest, S. (2013). La transition énergétique dans les transports. Conseil Economique, Social et Environnemental.
- Duron, P. (2013). Mobilité 21 « Pour un schéma national de mobilité durable », Rapport au ministre chargé des transports, de la mer et de la pêche
- Goodwin, P. (2012). Peak travel, peak car and the future of mobility. Discussion paper n°12 prepared for the Roundtable on Long-run Trends in Travel Demand, OECD FIT
- Hautière, N., De La Roche, C. et Jacquot-Guimbal, H. (2013). La « route » de cinquième génération (R5G). Revue Générale des Routes et de l'Aménagement, N°910, pages 28-35
- Jääskeläinen, J. (2013). Automated Driving from the European Perspective. TRB's Second Annual Workshop on Road Vehicle Automation, Stanford, California, USA
- Iossa, E., Martimort, D. et Pouyet, J. (2008). Partenariats Public-Privé : quelques réflexions,
- Revue économique, Vol. 59, No. 3, pp. 437-449
- Lamb, M., Collis, R., Deix, S., Krieger, B. et Hautière, N. (2012). Le Programme « Forever Open Road » : définition de la route de nouvelle génération. Routes-Roads – N° 352/353, pp. 120-129.
- Lebental, B. et al. (2012). Sensor networks toward city resilience. Project Sense-City: prototyping and large scale validation of. (micro & nano) sensors dedicated to sustainable cities .Smart Cities international conference.
- OCDE FIT (2008). Des chaussées à longue durée de vie pour routes à forte circulation.
- Ray, M. et Fougea, D. (2004). Evaluation de la politique routière du Ministère. Rapport du Conseil Général des Ponts et Chaussées.
- Sellam S., et Basset B. (2012). Quelle mobilité en 2030 ? Revue TEC, N°216-217.
- SETRA (2006). Propositions pour une relance du soutien à l'innovation routière. Rapport technique
- SMART 2010/0064 (2011). Definition of necessary vehicle and infrastructure systems for Automated Driving. Study report SMART 2010/0064.
- Sohm, J., Hornych, P., Kerzreho, J.-P., Cottineau, L.-M., Le Cam, V., Hautière, N., De La Roche, C. et Van Damme, H. (2012). Remote monitoring of an experimental motorway section – An enabling technology of the 5th generation road. International Journal of Pavement Research Technology. Vol.5, N°5, pp. 289-294.
- Starkl, M. et Brunner, N. (2004). Feasibility versus sustainability in urban water management. Journal of environmental management, N°71, pages 245-260
- Van Damme, H. (2012). La route et l'électricité : un coup de foudre qui pourrait durer. Congrès de l'IDRRIM