



THÉÂTRE LA REINE BLANCHE

2 BIS PASSAGE RUELLÉ
75 018 PARIS

M^o LA CHAPELLE/MARX DORMOY
RÉSERVATIONS : 01 40 05 06 96
WWW.REINEBLANCHE.COM

17 MAI

CASSER EN S'AMUSANT !

MATTEO CICCOTTI
(ESPCI),
LAURENT PONSON
(CNRS/UPMC),
ELISABETH BOUCHAUD
(ESPCI & CEA)

31 MAI

FORME, TEXTURE, MATIÈRE - QUAND PHYSIQUE ET ART SE RENCONTRENT

LUDOVIC PAUCHARD
(CNRS/UPSUD),
CÉLINE NADAL
(MUSÉES DE TROYES)

21 JUIN

LES INVENTIONS QUI ONT PRESQUE MARCHÉ

YVES BRÉCHET
(CEA & INPG),
NAÏS COQ

1^{ER} FÉVRIER

L'UNIVERS A-T-IL JAMAIS COMMENCÉ... ?

ÉTIENNE KLEIN
(CEA)

8 MARS

N'EST PAS MACHINE QUI VEUT.

ALAIN PROCHIANTZ
(COLLÈGE DE FRANCE)

12 AVRIL

JE CHERCHE...

SÉBASTIEN BALIBAR
(ENS PARIS),
MICHEL ALBERGANTI
(FRANCE CULTURE),
MARGOT SEGRETO
(CIE LA PEAU DE L'OURS)

SCÈNES
DE SCIENCE
LE DIMANCHE À 11H

Les routes de 5^e génération

Nicolas Hautière, Chantal de La Roche et Jean-Michel Piau

Économes en matériaux et en main-d'œuvre, non polluantes, productrices d'électricité, automatisées, sûres, etc. : les routes de demain devront répondre à des exigences nouvelles et nombreuses. Voici comment.



L'ESSENTIEL

- Les routes de demain sont confrontées à trois grands enjeux : le développement durable, la transition énergétique et la mobilité.
- Les revêtements et les chaussées seront conçus de façon à économiser matériaux, énergie et main-d'œuvre.
- À l'aide de panneaux photovoltaïques, les routes produiront elles-mêmes l'énergie nécessaire à l'éclairage, la signalisation ou la recharge des véhicules.
- Des systèmes de gestion et d'information automatisés joueront un rôle essentiel.

Måns Tham (architect & urban strategist, www.mansham.com)



DANS SON PROJET SOLAR SERPENT, l'architecte suédois Måns Tham propose de couvrir les autoroutes d'un toit de panneaux photovoltaïques afin de produire de l'électricité, qui alimenterait l'éclairage, la signalisation, etc. — et même les véhicules !



Après le chemin muletier, la voie romaine, le macadam puis l'auto-route, voici venu le temps des routes de cinquième génération. Dans un avenir plus ou moins proche, celles-ci intégreront diverses évolutions techniques et multiplieront les interactions entre véhicules et infrastructures afin de mieux répondre aux enjeux du développement durable, de la transition énergétique et de la mobilité.

Les routes d'aujourd'hui résultent d'une évolution plus que bimillénaire. Conçues initialement pour les cavaliers, elles 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. Au début du XX^e siècle, avec l'essor du trafic automobile, mais aussi avec le développement de la bicyclette, les chaussées, constituées de gros cailloux tassés au rouleau compresseur, ont été revêtues de goudron, de pavés bitumineux ou d'asphalte, comme

c'était déjà le cas pour les trottoirs dès le début du XIX^e siècle. Mais l'automobile continuait à utiliser les chemins et axes de transports des chevaux et hippomobiles, selon des tracés qui n'avaient pas été créés pour elle. C'est l'autoroute qui allait, au lendemain de la Seconde Guerre mondiale, répondre aux besoins des voitures et des poids-lourds, tant du point de vue de la vitesse que de la sécurité.

Trois enjeux majeurs

Ainsi, les routes sont vouées à se rénover en permanence, à assurer de nouvelles fonctions. Elles sont confrontées aujourd'hui à trois enjeux majeurs. Le premier est celui du développement durable, idée que l'on résume en « un développement qui répond au besoin du présent sans compromettre la capacité des générations futures à répondre aux leurs ». Le deuxième enjeu est celui de

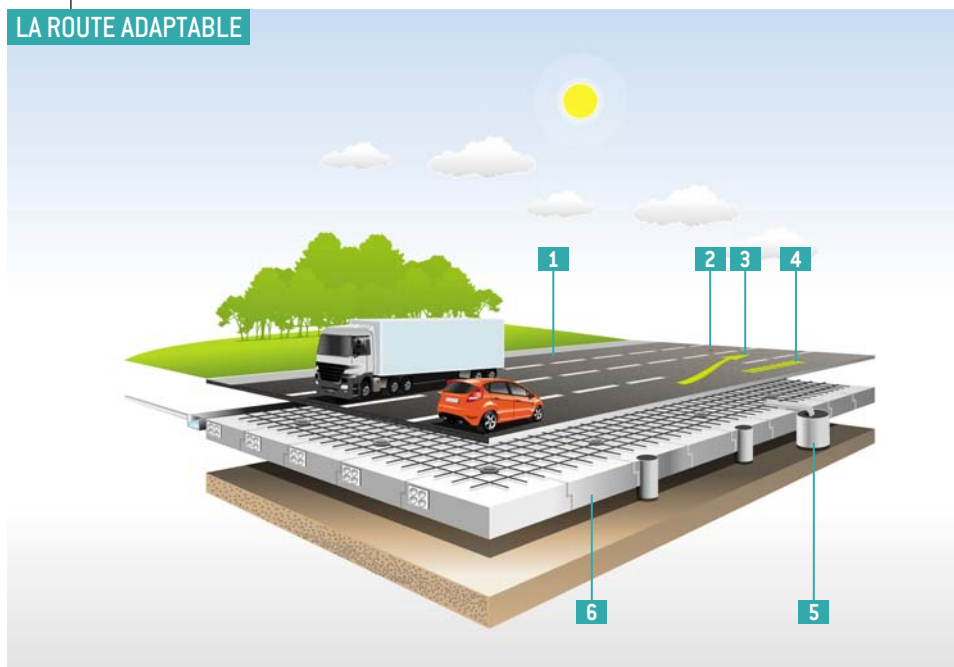
la transition énergétique, le passage du modèle énergétique actuel, fondé à 80 % sur les énergies fossiles (pétrole, gaz et charbon), à un nouveau modèle où domineront les énergies non carbonées (nucléaire et renouvelables). Enfin, le troisième enjeu est celui de la mobilité, qui conditionne le développement économique et social dans un monde de plus en plus connecté.

Ces enjeux nécessitent de repenser le transport routier, qui assure dans les pays développés plus de 80 % des flux de passagers et de marchandises, tout en consommant 60 % de l'énergie fossile produite sur Terre et en étant responsable de 25 % des émissions de gaz à effet de serre.

Cela appelle sans doute de nouvelles sources d'énergie pour les véhicules, mais aussi un nouvel art de construction des routes, afin de diminuer les nuisances, améliorer les conditions de mobilité et le cadre de vie dans les villes et les campagnes.

DES ROUTES ADAPTABLES, AUTOMATISÉES

LA ROUTE ADAPTABLE



LA ROUTE AUTOMATISÉE



Le Forum européen des laboratoires nationaux de recherche routière (FEHRL, pour *Forum of European National Highway Research Laboratories*) a été créé en 1989 et représente plus de 30 instituts et laboratoires, dont l'Ifsttar en France. Son programme phare, intitulé *Forever Open Road* et lancé en 2011, porte sur les routes de cinquième génération. Il s'articule autour de trois axes, « La route adaptable », « La route automatisée » et « La route résiliente » [aux

aléas climatiques]. Ces schémas résument les principales idées et techniques visées.

1 Revêtement écologique, autoréparable, poreux, silencieux, réfléchissant de nuit. **2** Capteurs intégrés à la voie pour le suivi et le contrôle du trafic. **3** Guidage modulable des véhicules. **4** Système intégré de recharge des véhicules électriques. **5** Recueil d'énergie solaire et alimentation pour éclairage, signalisation et capteurs.

Il faut le souligner, les choix en la matière sont en grande partie politiques. Mais ils dépendent aussi des technologies disponibles. Aussi, de leur côté, ingénieurs et chercheurs développent et testent des techniques susceptibles de bénéficier aux routes du futur, au sein de scénarios généraux guidés par les trois grands enjeux mentionnés. Passons en revue un certain nombre de ces innovations, qui donneront une idée plus concrète de ce que seront les routes d'ici 10, 20 ou 30 ans.

Un premier aspect porte sur les procédés de construction de chaussées. De façon générale, il s'agit d'économiser les ressources naturelles, en construisant des routes à partir de matériaux plus endurants au trafic et au climat, et cela avec des techniques compatibles avec le développement durable.

Pour économiser les ressources naturelles, une stratégie consiste à recycler les matériaux en place ou à employer, seuls

ou en supplément de matériaux neufs, des matériaux granulaires de diverses sources locales (mâchefers, pneus usagés, matériaux de déconstruction, coproduits industriels, etc.).

L'utilisation de ressources locales permet en outre de limiter les transports de matériaux liés aux chantiers routiers eux-mêmes, et ainsi de diminuer le coût énergétique des chantiers, dû en grande partie au transport des matériaux.

Pour les liants, une première idée consistait à remplacer les liants bitumineux, issus de la distillation des pétroles bruts, par des liants issus de matières végétales (celles utilisées pour fabriquer des biocarburants par exemple). Elle s'est vite heurtée à la réalité de la disponibilité des ressources et de la compétition avec la production alimentaire. S'il n'est donc pas concevable de remplacer la totalité du bitume par ce type de liants, d'autres pistes sont à l'étude, par

■ LES AUTEURS



Nicolas HAUTIERE est directeur de projet au département Composants et systèmes de l'Ifsttar, à Marne-la-Vallée.

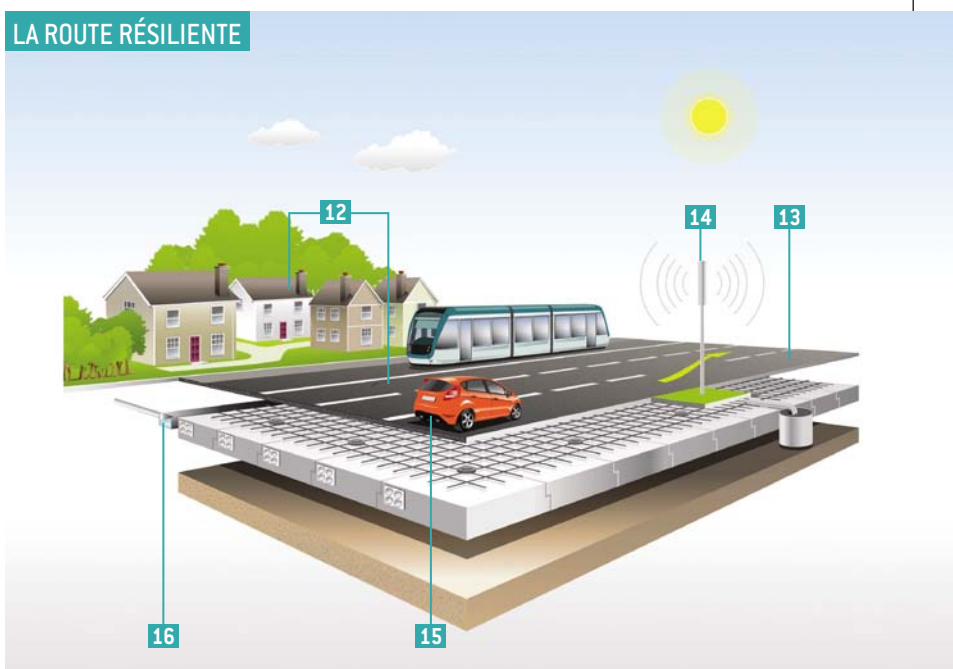
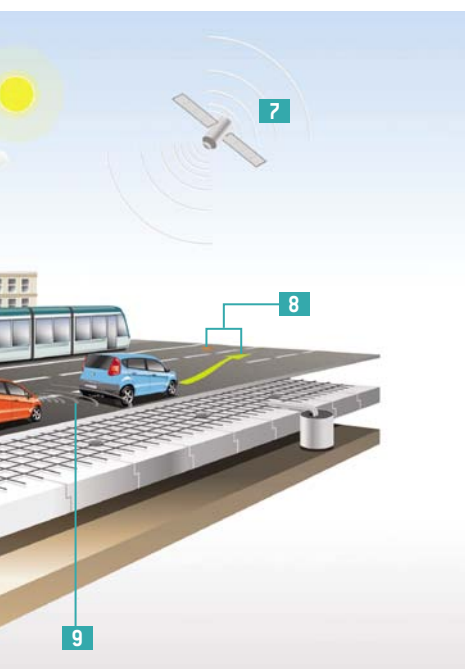


Chantal DE LA ROCHE est responsable de projet Route de 5^e génération à l'Ifsttar, à Nantes.



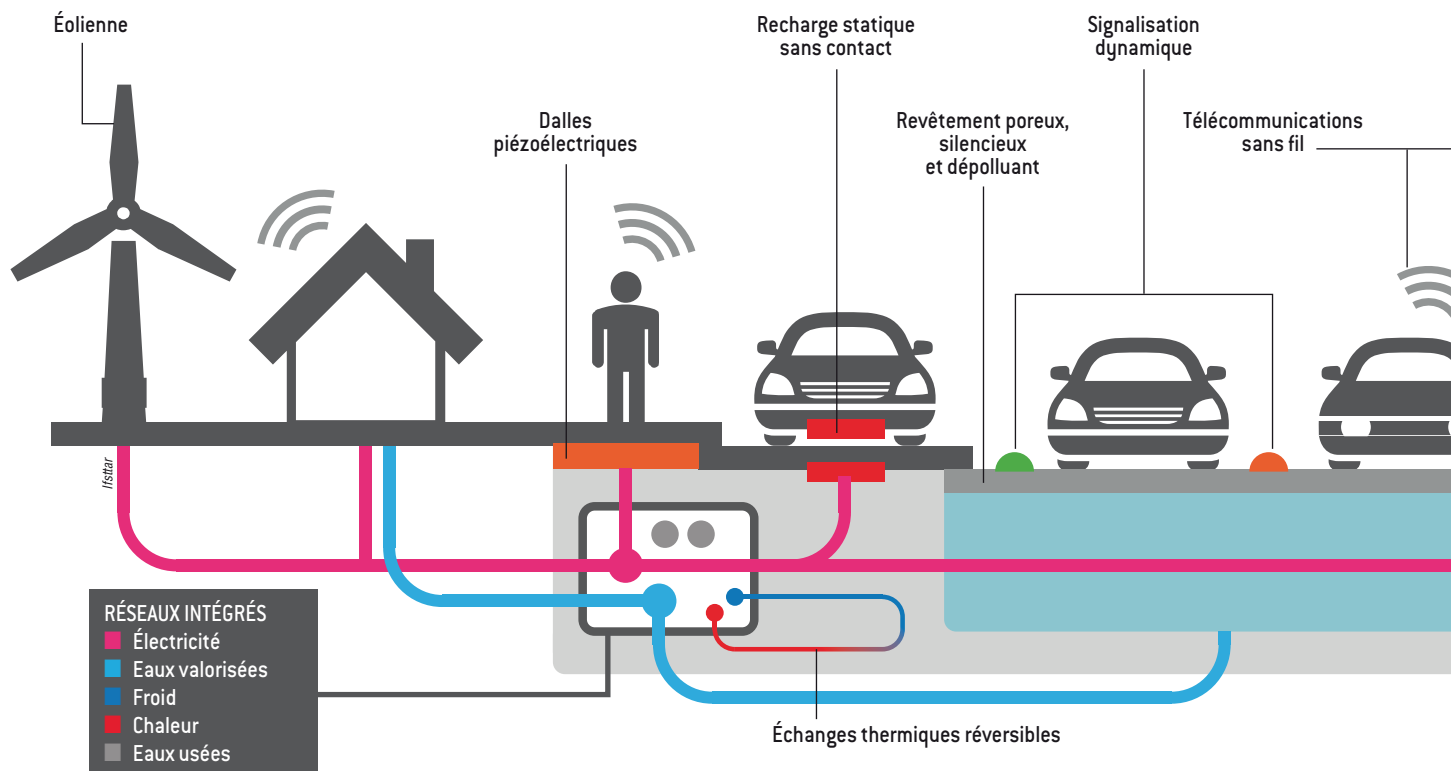
Jean-Michel PIAU est chercheur au laboratoire LAMES de l'Ifsttar, au centre de Nantes.

ET RÉSILIENTES AUX ALÉAS CLIMATIQUES



6 Éléments préfabriqués intégrant des réseaux de drainage, de communication et d'électricité. **7** Système de communication entre les infrastructures routières, les conducteurs et le réseau de contrôle. **8** Systèmes de guidage lumineux en fonction du trafic et des exigences du réseau routier. **9** Aide au regroupement de véhicules. **10** Capteurs embarqués pour localisation du véhicule et de ses voisins, gestion d'incidents, etc. **11** Capteurs intégrés pour le

contrôle du trafic, le suivi des conditions météorologiques et de la pollution. **12** Échanges de chaleur chaussée-bâti pour faire face à des événements météorologiques extrêmes. **13** Système intégré de déverglaçage. **14** Contrôle du trafic réactif aux conditions météorologiques, communication des prévisions météo en temps réel. **15** Système embarqué d'information météorologique. **16** Système de drainage et de réservoirs, en prévision de tempêtes.



REGROUPER DE MULTIPLES TECHNIQUES est nécessaire pour réaliser un espace routier de cinquième génération. Une telle intégration permettrait de satisfaire les exigences matérielles, énergétiques, environnementales et informationnelles des infrastructures routières de demain.

exemple l'emploi de ces liants végétaux en petite quantité pour régénérer le bitume ancien lors des opérations de recyclage, ou bien la mise au point de liants alternatifs issus de biomasses non alimentaires. On peut notamment citer les liants à base de micro-algues, qui font l'objet du projet *Algoroute* porté par plusieurs organismes français, dont l'Ifsttar (Institut français des sciences et technologies des transports, de l'aménagement et des réseaux).

Par ailleurs, on cherche à augmenter les taux actuels de recyclage des matériaux pour chaussées, qui atteignent généralement 10 à 30 % par rapport aux matériaux neufs. Cela exige à la fois de meilleurs procédés de tri, une meilleure prise en compte des cycles de vie des matériaux et la mise au point de méthodes d'étude permettant d'évaluer et d'optimiser le comportement des matériaux recyclés. Il s'agit aussi de développer des outils industriels permettant de réchauffer le matériau bitumineux ancien afin de pouvoir le malaxer et le mettre en œuvre sans altérer définitivement les propriétés du liant.

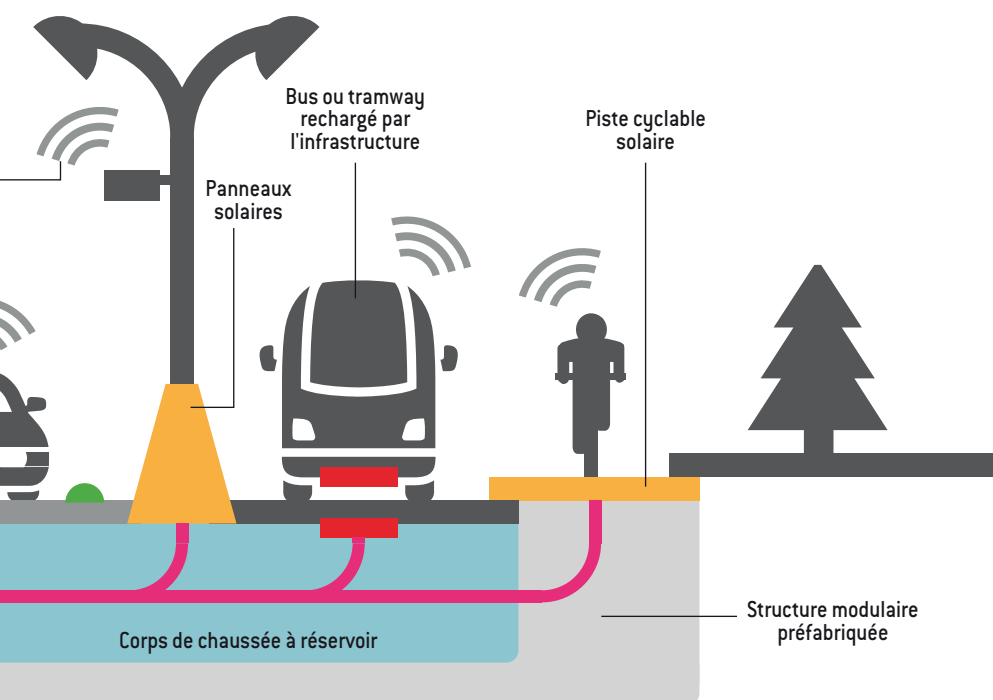
Certaines techniques de recyclage se révèlent, à l'usage, vertueuses à plusieurs

titres. À l'Ifsttar, nous avons ainsi récemment montré que l'exposition à l'air libre des bétons de déconstruction avant réemploi permet de piéger une partie du dioxyde de carbone (CO_2) atmosphérique, ce qui contribuerait à réduire les émissions de gaz à effet de serre. Un autre exemple est l'incorporation de granulats de caoutchouc, obtenus par broyage de pneus usagés, aux couches superficielles des chaussées : ce recyclage de matériau conduit du même coup à une diminution du bruit de trafic.

Des matériaux plus résistants

Afin d'économiser les matériaux, une autre approche est de mettre au point des matériaux très résistants à la circulation et aux agressions climatiques, qui laissent envisager des routes dites perpétuelles, à longue durée de vie.

Un exemple de cette démarche est représenté par les enrobés à base de résine époxy, déjà employés comme revêtements sur les tabliers de ponts en acier ou en zones de virage sur autoroute. Plus récemment, l'Ifsttar a développé, dans le cadre



d'un projet de recherche européen, un revêtement de chaussée à base de béton de ciment qui garantit des propriétés de surface (adhérence, étanchéité, etc.) sur une durée de l'ordre de 30 ans au lieu de 10 actuellement. Bien que trois fois plus coûteux, un tel revêtement permet d'espacer les opérations de maintenance, à l'origine de nombreux retards et gênes chez les usagers ou les riverains.

Une approche alternative consiste à mettre au point des matériaux autoréparables. L'une des techniques explorées est d'inclure dans le revêtement des microcapsules de bitume frais. Sous le poids des charges roulantes, en particulier des poids-lourds, ces microcapsules éclatent peu à peu, libérant ainsi le bitume et rajeunissant le matériau, qui conserve alors sa souplesse.

Pour augmenter le pouvoir autoréparateur des liants routiers, une autre technique envisagée est l'inclusion de fibres métalliques dans le béton bitumineux, qui devient ainsi conducteur électriquement. Il suffit ensuite de chauffer le matériau, en y induisant des courants électriques à l'aide d'un appareil dédié, pour refermer

les fissures et ainsi prolonger la durée de vie de la chaussée.

Économiser les ressources naturelles est ainsi l'un des objectifs de l'industrie routière. Un autre est de limiter les impacts environnementaux liés à la construction et l'entretien des routes ainsi qu'au trafic. Il s'agit entre autres de réduire la consommation d'énergie lors de la fabrication des matériaux bitumineux. Ainsi ont vu le jour

**Parmi les objectifs :
économiser les ressources
naturelles et limiter
les impacts environnementaux.**

de nombreux procédés de fabrication et de mise en œuvre des enrobés à des températures moins élevées qu'auparavant (« enrobés tièdes »), voire à froid (avec des émulsions de bitume).

Un autre impact environnemental du trafic est le bruit, que l'on cherche à limiter là où il est le plus gênant, à savoir en milieu urbain et péri-urbain. Plusieurs techniques permettent de réduire le bruit au niveau du

contact pneu-chaussée. Ce bruit domine aux basses vitesses, par rapport à celui des moteurs, et il pourrait demain constituer la source sonore prépondérante avec la généralisation des véhicules électriques.

Les revêtements drainants, introduits dans les années 1970-1980 principalement afin de diminuer les projections d'eau par temps de pluie, constituent une première solution. Obtenus par mélange de granulats de grande et petite tailles, en évitant les tailles intermédiaires, ces matériaux sont très poreux et perméables. Or cela a aussi pour effet de limiter les surpressions d'air créées entre le pneu et la chaussée, en grande partie responsables du bruit de roulement. Des variantes plus récentes mettent en œuvre un empilement de couches drainantes de porosités distinctes, ce qui atténue le colmatage, donc la dégradation de la drainabilité avec le temps.

Dans le même ordre d'idées, on teste aux Pays-Bas des chaussées qui incluent dans leur partie supérieure des cavités préfabriquées de taille décimétrique. Ces cavités, qui constituent des « résonateurs de Helmholtz », sont 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 formés de granulats plus petits (de l'ordre de 6 millimètres de diamètre au lieu de 14). On réduit ainsi les vibrations engendrées au contact pneu-chaussée, tout en améliorant les propriétés d'adhérence et ce sans détériorer la drainabilité.

Par ailleurs, en incorporant au bitume des granulats ou de la poudre de caoutchouc, issus notamment du recyclage de pneus usagés, on peut rogner encore quelques décibels sur le bruit. Enfin, les ingénieurs développent des murs antibruit de nouvelle génération, de structure fractale (la même structure se répétant à différentes échelles), qui aident à éliminer le bruit résiduel.

Les chaussées contribueront aussi à la lutte contre la pollution atmosphérique. Comme les murs extérieurs des bâtiments dans les villes, elles peuvent dégrader certains polluants grâce à la photocatalyse par dioxyde de titane (TiO_2). Sous l'effet des rayons ultraviolets reçus du Soleil, ce composé, incorporé dans les matériaux de construction, capte les oxydes d'azote (NO_x) présents dans l'air et les transforme



UNE PISTE CYCLABLE, dont l'une des deux voies (à gauche) est constituée de panneaux solaires sur une longueur de 100 mètres, a été inaugurée fin 2014 à Krommenie, aux Pays-Bas. Il s'agit d'une expérimentation pilote de route à énergie positive, produisant de l'électricité qui alimenterait l'éclairage, la signalisation, etc.

en composés stables qui sont ensuite lessivés par les pluies. Par exemple, le fabricant français *Eurovia* commercialise un revêtement censé éliminer plus de 4 milligrammes d'oxydes d'azote par mètre carré et par heure.

Des chaussées en kit

Les routes devant répondre à des exigences de plus en plus complexes, une approche est de concevoir des éléments de chaussée préfabriqués en usine, qui seront utilisés sur des tronçons rectilignes limités. Ces éléments intégreront dans leur épaisseur les aménagements nécessaires aux différents réseaux (électricité, communications, etc.). Dans ce contexte, les ingénieurs développent des procédés de pose rapide qui raccourciront la durée des chantiers de construction. Et avec la possibilité de démonter ces éléments de chaussée, on pourra aisément remplacer ceux qui sont défectueux ou accéder aux réseaux souterrains.

Le procédé est d'ores et déjà utilisé pour certaines intersections de rues et voies de tramways. Par exemple, aux Pays-Bas, une section de l'autoroute A12 a été réalisée en 2006 sous forme de chaussée modulaire reposant sur des fondations à base de pieux. Cette chaussée modulaire, élaborée par le consortium *ModieSlab*, permet de franchir

Moins de chaleur, plus de lumière

On peut concevoir des revêtements qui font jouer aux chaussées urbaines un rôle de régulation thermique. Grâce à leur grande porosité, donc à l'air qu'ils contiennent, les enrobés drainants peuvent servir d'isolants, afin d'empêcher que le sol urbain emmagasine de la chaleur. Par ailleurs, en employant des granulats clairs, non seulement on rafraîchit le milieu urbain en période estivale (en augmentant l'albédo, la part du rayonnement réfléchi vers le ciel), mais on diminue aussi la puissance de l'éclairage public nocturne pour un même confort visuel des usagers.

des zones à sols très compressibles, à la façon d'un petit ouvrage d'art.

En France, deux sections expérimentales de « chaussée urbaine démontable », 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 ouvertes et refermées, à l'aide d'un matériel léger et silencieux, ce qui réduit la gêne occasionnée par les travaux d'entretien des réseaux en sous-sol (voir les photographies page 33).

Produire de l'énergie

Dans le domaine du transport routier, la transition énergétique a pour écho la notion de routes à énergie positive, c'est-à-dire des routes qui collecteront de l'énergie pour leur propre usage – régulation thermique, signalisation, éclairage, etc. Il s'agira aussi de fournir l'énergie nécessaire aux véhicules électriques non seulement à partir de stations-services ou bornes adaptées, mais aussi à partir de dispositifs d'alimentation électrique continue route-véhicules.

Comment cela peut-il se traduire concrètement ? L'une des idées est d'exploiter l'énergie solaire, en tirant profit de la grande superficie occupée par les routes, emprises et espace roulant compris.

En Bavière, une usine photovoltaïque de un mégawatt a ainsi été installée le long de l'autoroute A94 en exploitant les pentes des déblais autoroutiers, ce qui évite tout conflit d'usage des terres agricoles. De façon plus novatrice, on peut recouvrir l'espace roulant lui-même de panneaux photovoltaïques.

Dans le cadre du projet *SolaRoad*, le TNO (l'Organisation néerlandaise pour la recherche scientifique appliquée) a ainsi conçu des panneaux de cellules photovoltaïques en silicium cristallin recouvertes d'une couche d'un centimètre d'épaisseur de verre trempé, cette couche étant rugueuse pour assurer un bon niveau d'adhérence. Selon ses concepteurs, le procédé produit 50 kilowattheures par mètre carré et par an (soit environ 1 % de l'électricité consommée par un foyer).

Une piste cyclable pilote longue de 100 mètres et large de 4 mètres a ainsi été inaugurée fin 2014 dans la ville de Krommenie, au Nord-Est de Haarlem (voir la photographie ci-dessus). Cette première phase du projet, prévue sur cinq ans, est destinée à mieux appréhender la gestion technique

et la rentabilisation de telles installations (stockage et redistribution du surplus d'énergie produit en période d'ensoleillement, impact du salissement, etc.).

L'architecte suédois Måns Tham a, lui, conçu le projet *Solar Serpent* (Serpent solaire) dans lequel il propose de transformer des autoroutes, notamment celles de Los Angeles, en usine électrique, en les couvrant d'un toit de panneaux photovoltaïques fixés sur un châssis en treillis (voir l'illustration pages 26-27). Outre la production d'électricité et sa consommation locale pour la signalisation, l'éclairage ou la recharge des véhicules, le concept a d'autres avantages : réduction du bruit pour les riverains, protection des chaussées contre les intempéries et le rayonnement ultraviolet, diminution de la climatisation à bord des véhicules grâce à l'ombre créée.

capte par temps ensoleillé la chaleur en surface, que l'on stocke ensuite dans des puits géothermiques verticaux situés en bord de route. Par temps froid et couvert, cette énergie est alors déstockée et rediffusée à travers les mêmes circuits, afin de maintenir la surface de la chaussée à température positive et éviter le dépôt de neige ou la formation de verglas. On utilise déjà cette technique pour réguler les températures des tabliers de certains ponts particulièrement sensibles au gel en Suisse (projet SERSO) et en Allemagne (pont de Berkentin en Allemagne du Nord).

La déformation des routes sous l'action des véhicules peut également fournir de l'énergie, comme en ont eu l'idée des chercheurs du *Technion*, en Israël. Il s'agit de convertir les contraintes mécaniques en courant électrique par effet piézoélectrique,

L'Europe routière (UE-27, 2011)

69 600 km d'autoroutes
(11 490 km en France).

283 millions de véhicules,
dont 86 % de particuliers
(37,9 millions en France).

5 427 milliards
de voyageurs-kilomètres,
soit 93 % du transport
terrestre de voyageurs.

1 734 milliards
de tonnes-kilomètres de
marchandises transportées.

856 millions de tonnes
de CO₂ émises (23 % du total).



Dans le projet de Måns Tham, l'autoroute de Santa Monica, à Los Angeles (longue de 24 kilomètres pour une largeur de 40 mètres), recevrait ainsi un million de mètres carrés de panneaux, de quoi produire 150 gigawattheures d'électricité par an (soit la consommation d'environ 40 000 foyers) avec les techniques photovoltaïques actuelles.

Pour exploiter le rayonnement solaire sur les routes, une autre idée est de profiter du fort pouvoir d'absorption thermique des chaussées bitumineuses. Ces dernières peuvent, aux latitudes de la France, atteindre 60 à 65 °C en été. En faisant circuler un fluide caloporteur dans un serpentif enfoui dans la chaussée, on

les dispositifs piézoélectriques étant intégrés à la chaussée.

Ce type de technique est toutefois discutable. L'énergie obtenue est prélevée d'une façon ou d'une autre sur celle des véhicules, ce qui n'apporte globalement rien en termes d'économies d'énergie. En revanche, la technique piézoélectrique permettrait d'assurer certains services en des lieux isolés, non connectés au réseau d'alimentation électrique.

Le transport routier consommant beaucoup d'énergie fossile, les véhicules actuels seront, à terme, remplacés par des véhicules électriques. La route du futur doit non seulement s'y adapter, mais aussi être pensée comme partie

LES CHAUSSEES URBAINES DÉMONTABLES

sont des chaussées conçues pour être facilement ouvertes et refermées, dans un délai d'environ une demi-journée, notamment afin d'accéder aux réseaux souterrains. Une telle chaussée modulaire (ci-dessus, une première mondiale réalisée en 2009 à Saint-Aubin-lès-Elbeuf, en Seine-Maritime) simplifie beaucoup les travaux de voirie.

intégrante de nouvelles boucles d'énergie infrastructures-véhicules.

Pour les voitures électriques, on privilégie aujourd'hui le recours à des bornes de recharge individuelles (à domicile) ou collectives (dans la rue). L'utilisateur branche lui-même son véhicule à la borne, ce qui n'est pas très commode. D'autres solutions sont à l'étude, par exemple le « biberonnage » qui consiste à connecter automatiquement les véhicules électriques aux bornes électriques. Une station expérimentale de biberonnage existe ainsi dans le XVI^e arrondissement de Paris depuis janvier 2012.

Pour augmenter l'autonomie des véhicules, une autre approche consiste à leur fournir l'énergie électrique sans qu'il y ait contact, à l'aide de techniques fondées sur l'induction électromagnétique. Divers procédés sont en cours de mise au point. 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 dynamique, c'est-à-dire une recharge des batteries du véhicule pendant qu'il roule. Il ne s'agit pas d'assurer une telle fonction sur la totalité des routes et de leurs tracés, mais sur certains segments plus stratégiques ou économes, tels que la périphérie des grandes villes ou les longues sections autoroutières en montée.

La société *Siemens* expérimente ainsi l'adaptation du système de caténaires des trolleybus (dont les premiers exemplaires datent de 1882) pour la recharge de poids-lourds à moteurs hybrides électricité-diesel. L'alimentation par le sol, développée par *Alstom* à la fin des années 1990 pour les tramways (par exemple à Bordeaux), est une autre méthode possible, moins intrusive pour l'environnement et les paysages. Elle consiste à implanter un rail d'alimentation en milieu de voie, qui vient en contact avec des « frotteurs » du tramway. Le rail est segmenté en tronçons, qui ne sont actifs que s'ils sont entièrement recouverts par le tram, afin d'éviter tout risque d'électrocution pour les autres usagers de la voie (piétons, cyclistes, etc.). Cette technique est en cours d'adaptation aux véhicules routiers.

De son côté, l'entreprise *Bombardier* a montré qu'il est possible d'alimenter en marche et sans contact, par couplage

inductif, des tramways ou des véhicules routiers. À l'Ifsttar, nous avons vérifié qu'il est possible d'intégrer cette solution dans les chaussées sans diminuer leur durée de vie. L'expérimentation de la société OLEV en Corée du Sud a également montré qu'on peut transposer le principe à la route. Fondé sur des dispositifs de recharge enfouis dans la chaussée, le système coréen recharge des véhicules à l'arrêt ou en mouvement avec un rendement énergétique supérieur à 80 %. 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, aux trajectoires moins contraintes donc moins prévisibles, reste l'objet de recherches (projet européen FABRIC, notamment).

Des capteurs intégrés à la voie

ou portés par les véhicules
mesureront les conditions
météorologiques
et de trafic

Ces quelques exemples illustrent les différentes fonctions énergétiques que les routes de cinquième génération seront appelées à remplir. On voit aussi apparaître la notion de système faisant intervenir à la fois les véhicules, les routes et les dispositifs mis en place pour les contrôler. Ce système est au cœur du troisième défi sociétal auquel les routes doivent répondre, celui d'une mobilité durable, sûre et efficace.

En particulier, l'état des routes pourra être déterminé en permanence et en temps réel, informations qui seront transmises aux autorités ou dispositifs de contrôle afin de reconfigurer dynamiquement les routes et le trafic. Dans un proche avenir, les différents centres de gestion de la mobilité (trafic,

transports collectifs, parkings, péages, etc.), les capteurs installés le long des routes et les véhicules seront largement interconnectés.

L'entretien et la maintenance des infrastructures tireront avantage de ces réseaux d'information. Des capteurs embarqués sur les véhicules détermineront presque en temps réel l'état du revêtement, tandis que des réseaux de capteurs intégrés aux chaussées mesureront le vieillissement de ces dernières, afin de prédire leur dégradation et d'aider le gestionnaire à choisir le moment et la nature des travaux de maintenance à réaliser.

Quelques exemples laissent imaginer les bénéfices attendus de l'interaction entre réseaux d'information et véhicules communicants. Ainsi, des dispositifs de capteurs placés en bord de voie ou à bord des véhicules mesureront les conditions météorologiques (brouillard, températures de chaussée, hauteur de neige, etc.). Ces informations seront échangées entre les différents acteurs du trafic et transmises aux systèmes d'information des usagers de la route. Ces derniers pourront alors rouler à des vitesses adaptées, voire emprunter des itinéraires alternatifs qui optimisent la consommation d'énergie, le temps de parcours et la sécurité.

De même, grâce à une communication généralisée, on pourra reconfigurer l'espace routier en fonction de la demande de déplacement, en s'appuyant sur une signalisation plus innovante. La signalisation routière classique (marques sur chaussées, panneaux) a l'inconvénient de rester inchangée quelles que soient les conditions de circulation. Pour pallier cet inconvénient, l'usage de diodes électroluminescentes (LED), en complément de la signalisation existante, fait son apparition et permet par exemple d'affecter dynamiquement les voies de circulation en fonction du trafic. Sur le pont de Saint-Nazaire, le Conseil général de Loire-Atlantique expérimente une telle solution : la voie centrale du pont change de sens le matin et le soir afin d'optimiser les trajets domicile-travail.

Dans le même ordre d'idées, on peut imaginer qu'en milieu péri-urbain, les autoroutes allouent dynamiquement, selon le jour et l'heure, des voies supplémentaires

pour les «covoitureurs» et les transports collectifs. De façon similaire, en milieu urbain, l'espace public serait reconfiguré par une signalisation modulable en fonction de l'heure de la journée ou du jour de la semaine, notamment pour optimiser le partage entre les différents modes de transport (véhicules de particuliers ou en libre partage, cyclistes, piétons, transports en commun, etc.).

Des démonstrateurs

On le voit avec les exemples présentés tout au long de cet article, les chercheurs et les ingénieurs élaborent des techniques diverses et nombreuses en vue de relever les grands défis du transport routier. Lesquelles seront effectivement déployées ? La concrétisation des meilleures idées nécessite, outre leur indispensable acceptabilité sociétale, une structuration du milieu scientifique et industriel autour de démonstrateurs de recherche partagés. Intermédiaire entre le laboratoire et le déploiement industriel, le démonstrateur de recherche est une

■ BIBLIOGRAPHIE

N. Hautière et al., La « route » de cinquième génération (R5G), *Revue Générale des Routes et Autoroutes*, vol. 910, pp. 28-35, 2013.

N. Hautière et al., Comment adapter les infrastructures routières aux enjeux de la mobilité de 2030, *Transport Environnement Circulation*, vol. 216, pp. 25-32, 2013.

M. Lamb et al., The Forever Open Road - Defining the next generation road, *Routes/Roads*, vol. 352-353, pp. 120-129, 2012.

expérimentation, de préférence en vraie grandeur et sur route ouverte, qui accélère l'évaluation des solutions conçues en laboratoire et qui identifie les plus prometteuses d'entre elles. L'ancienne autoroute A199, près de notre institut à Marne-la-Vallée, devrait ainsi servir dès 2017 à préfigurer une route de cinquième génération, comme le stipule un accord-cadre signé fin 2014 entre le Conseil général de Seine-et-Marne, l'Établissement public d'aménagement Epamarne et l'Ifsttar.

Ainsi, pour répondre aux exigences actuelles du développement durable, de la transition énergétique et de la mobilité, les routes du futur seront plus économes, adaptables, automatisées, résilientes au changement climatique. Dans un contexte socio-économique devenu délicat, leur déploiement constitue un immense défi. Il faudra le relever pour préserver notre mobilité. En comparaison avec le passé, ce sont la multiplicité des enjeux et la synergie nécessaire entre acteurs d'horizons très différents qui rendent ce défi à la fois complexe et passionnant. ■

Dans l'interêt de la science

mathieu vidard | la tête au carré 14:05-15:00

france **inter**venez
franceinter.fr

CANCER

ces cellules qui perdent le contact

Jean-Pascal Capp

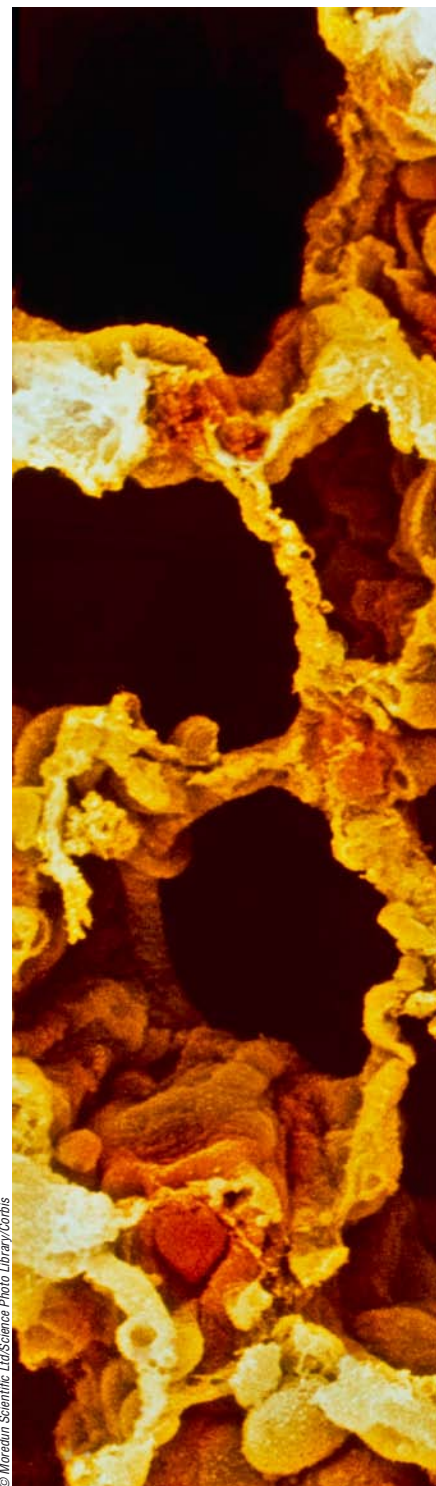
Et si la cause première des cancers n'était pas une altération des gènes, mais un défaut de communication de cellules avec leur environnement ? Rétablir le contact pallierait les limites des thérapies actuelles.

Début janvier, une étude statistique sur la survenue des cancers a été largement relayée dans la presse, souvent à travers des interprétations abusives. « La malchance à l'origine de la plupart des cancers », « Deux cancers sur trois imputables à la malchance », « Le hasard, cause principale de cancer »... Tels sont quelques-uns des titres qui ont fleuri sur le Net. Le travail en question établit une corrélation mathématique entre la fréquence d'apparition des cancers dans certains tissus et la fréquence des divisions des cellules souches dans ces tissus. Ces divisions, à la base du renouvellement des tissus, peuvent être nombreuses, comme dans l'intestin, ou plus rares, comme dans les os. Or plus une cellule se divise, plus le risque est grand qu'une mutation aléatoire apparue lors d'une division perturbe un gène lié au développement d'un cancer. Les

auteurs, Cristian Tomasetti et Bert Vogelstein, en ont conclu que dans deux tiers des cas, la fréquence élevée des cancers est due à la malchance – des mutations aléatoires apparues lors des divisions cellulaires – plus qu'à des facteurs environnementaux ou à des prédispositions génétiques.

L'utilisation du terme « malchance » a entraîné des raccourcis : on a ainsi pu lire qu'une majorité de ces cancers sont dus à des mutations dont il n'existe aucun moyen de se prémunir. Il ne serait donc pas nécessaire de surveiller son mode de vie et d'éviter l'exposition à des environnements délétères puisque l'apparition de ces cancers ne serait due qu'à la « malchance génétique » des individus affectés.

Au-delà du caractère critiquable de divers aspects de ce travail et des maladresses des chercheurs dans certaines formulations, cette étude est surtout



© Moredun Scientific Ltd/Science Photo Library/Corbis