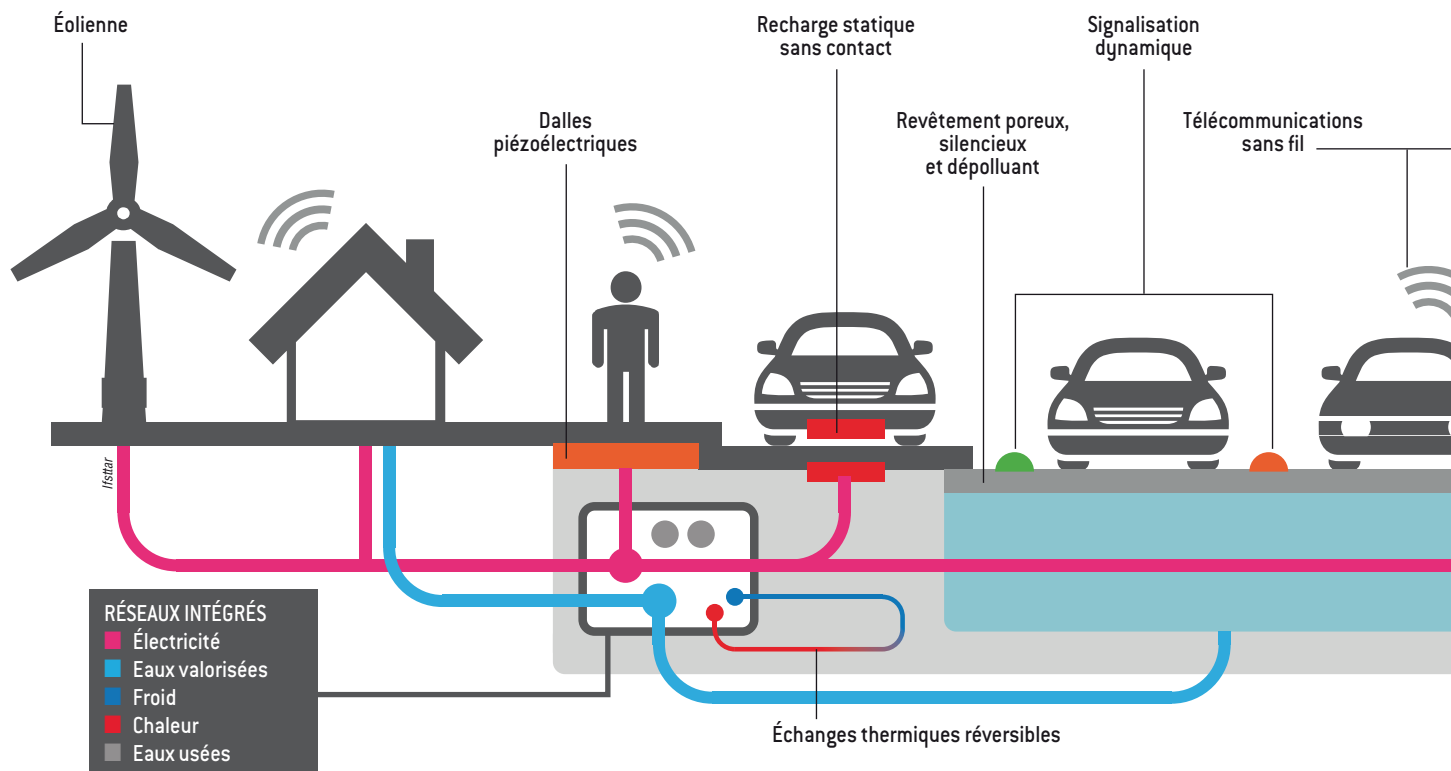




**REGROUPER DE MULTIPLES TECHNIQUES** est nécessaire pour réaliser un espace routier de cinquième génération. Une telle intégration permettrait de satisfaire les exigences matérielles, énergétiques, environnementales et informationnelles des infrastructures routières de demain.

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.

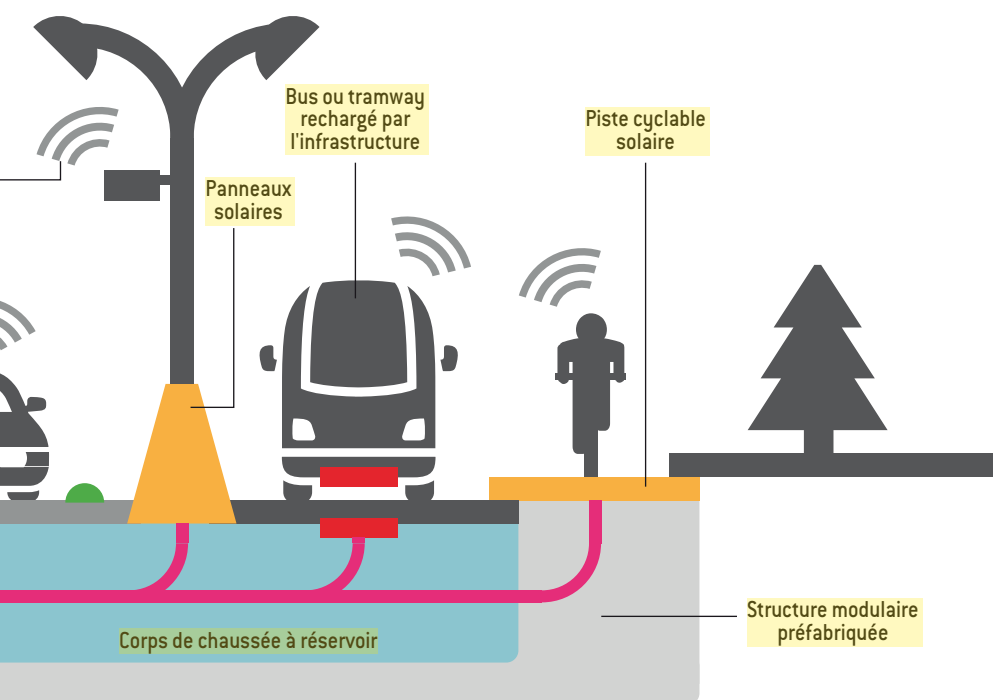
Certaines techniques de recyclage se révèlent, à l'usage, vertueuses à plusieurs

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 ( $\text{CO}_2$ ) 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 ( $\text{TiO}_2$ ). Sous l'effet des rayons ultraviolets reçus du Soleil, ce composé, incorporé dans les matériaux de construction, capte les oxydes d'azote ( $\text{NO}_x$ ) 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.

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

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.