

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 Berkhentin 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'Isttar, 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