

ATELIER 6 : EXPLOITATION ROUTIERE

Depuis la route romaine en pavé, la route comme infrastructure a connu au fil du temps des changements selon les besoins et le développement de chaque ère. Nous sommes au 21ème siècle et les routes doivent s'imprégner de notre développement. Le développement de ces infrastructures n'est pas juste une partie de plaisir ou à titre de curiosité scientifique, mais c'est un passage obligé vu que l'environnement, où se développent les projets, est devenu une contrainte à prendre en considération lors de l'étude et dans l'exécution des infrastructures. De cela vient une question importante : comment peut-on obtenir des infrastructures résilientes à haut niveau de performance tout en intégrant la composante environnementale ?

L'IFSTTAR (institut Français des sciences et technologies des transports, de l'aménagement et des réseaux) s'est penché sur cette question d'une façon approfondie.

De prime abord, il faut donner une acception au mot résilience dans le contexte des infrastructures routières. Une «infrastructure est considérée comme résiliente lorsque, à la suite d'un événement destructeur, sa réparation permet facilement et rapidement de revenir à un niveau d'usage proche voire identique à celui précédant l'évènement». Cette définition permet de limiter les actions afin de réaliser « une infrastructure résiliente »¹. Selon cette approche, il faut que celle-ci soit caractérisée par la facilité et la rapidité à rétablir suite à l'avènement des dégâts, en termes d'études et d'exécution, pour qu'elle soit opérationnelle dans les plus brefs délais.

Pour atteindre cet objectif, il faut traiter principalement trois idées : comment accroître la durabilité des chaussées ? Comment limiter les impacts des routes (exécution, exploitation et entretien) vis-à-vis l'environnement ? Et finalement, comment exploiter le réseau routier pour le rendre producteur d'énergie ?

Actuellement, les structures de chaussées sont dimensionnées pour une durée de 15 à 20 ans, hormis les revêtements sont caractérisés par des durées de vie beaucoup moins importantes. Pour accroître la résilience des routes,

¹ <http://www.ifsttar.fr/ressources-en-ligne/espace-science-et-societe/infrastructures/dossiers-thematiques/a-quoi-ressembleront-les-routes-de-5eme-generation-r5g/>

l'IFSTTAR a conduit des recherches, en collaboration avec le groupe de travail «*Long-Life pavement*», pour développer des matériaux plus résistants. Le fruit de cette collaboration a conduit à l'innovation d'un nouveau type de matériaux enrobés en bitume-époxy, à la base de ce dernier une couche de roulement ultra-résistante se voit réalisable.

Sur les sections urbaines, la gestion et l'entretien des réseaux (télécom, eau, assainissement, etc.) constitue une source de gêne et de nuisance pour l'exploitant et l'environnement. Pour réduire au maximum le temps de perturbation, sur les sections à traiter, l'IFSTTAR en partenariat avec des industriels a présenté une chaussée démontable. Cette chaussée est une structure rigide (dalles en béton hexagonales préfabriquées) amovible qui permette un accès rapide aux réseaux. En plus de leur maniabilité lors de la pose, ces dalles peuvent être modelées en usine de telle sorte à acquérir caractéristiques, physique et mécanique, bien défini (texture variable, surface poreuse, silencieuses et dépolluantes, etc.).

Aussi, le réseau routier s'étale sur des grandes surfaces qu'on peut rendre encore plus utile. En outre de sa première fonction : supporter les véhicules et faire transiter les usagers, de nos jours, il y a moyen de rendre ces surfaces productrices d'énergie à la base des panneaux photovoltaïques. Il serait très ambitieux de vouloir produire de l'énergie à grand échelle, mais l'objectif est de produire assez pour l'autosuffisance de la route elle-même ; à l'exemple des équipements de signalisation lumineuse, des panneaux d'informations etc.

Si le passage vers des routes plus résilientes est un objectif à court et moyen terme, l'ambition de concevoir des routes modernes elle, nécessite, en plus des mesures susmentionnées, l'intégration des Nouvelles Technologie d'Information et de Communication (NTIC) au sein des infrastructures routières (connectivité aux systèmes d'information, gestion de trafic, navigation, guidage etc.).

1. Pour une meilleur résilience

Il est impératif de concevoir la problématique dans ça globalité. Les fermetures fréquentes de routes à des fins de réparation et de remise en état constituent un problème croissant pour l'Administration et les usagers, en raison de leurs coûts, des restrictions d'accès qu'elles imposent, des encombrements et des perturbations qu'elles causent sur les flux de circulation, ainsi que des temps d'attente et des coûts qu'elles occasionnent aux usagers. Dans ces circonstances, les chaussées à longue durée de vie, revêtues de matériaux avancés, ont beaucoup à offrir, notamment si elles peuvent afficher des performances optimales sans exiger de réparations

majeures pendant plus de 30 ans. Sur les routes à forte circulation, les recherches ont montré que, dans ce contexte, les avantages apportés par l'absence de réparations et de remises en état importantes peuvent être suffisamment grands pour justifier les coûts initiaux élevés de ces revêtements de chaussées avancés. Sur cette partie, une présentation des matériaux avancés sera faite, entre autres, le bitume-époxy et l'enduit hydraulique fibré gravillonné.

a. Le bitume-époxy

Le bitume-époxy est un excellent matériau, employé depuis de nombreuses années comme revêtement routier sur tabliers de ponts rigides. Cette application, réalisée pour la première fois à San Francisco, continue de satisfaire aux exigences de performance, après 40 ans de service. Avec le temps, l'utilisation du bitume-époxy pour les tabliers de ponts rigides s'est développée dans un certain nombre de pays.

Les Administrations routières n'utilisent pas le bitume-époxy pour les revêtements de chaussées routières ordinaires, car il existe des matériaux moins coûteux qui sont certes moins durables, mais qui peuvent à chaque fois être remplacés assez facilement et pour un coût modéré. Les essais à petit échelle ont été l'occasion de tester les propriétés et l'intérêt du bitume-époxy dans ces environnements routiers.

Les nombreux essais réalisés sur le bitume-époxy à base d'acide ont couvert toutes les questions importantes concernant les propriétés connues pour être déterminantes en matière de durabilité et de longévité d'une chaussée à fort trafic. Ils ont notamment été axés sur les caractéristiques de fatigue et de rupture, particulièrement importantes pour la durée de service.

Au vu des essais réalisés, il est apparu que les enrobés de bitume-époxy à base d'acide avaient des performances nettement supérieures à celles des enrobés classiques. Les bitumes époxy polymérisés sont, en particulier, comparés aux bitumes traditionnels, sensiblement :

- Plus rigides (module plus élevé) aux températures de service et dotés d'une meilleure capacité de répartition des charges ;
- Plus résistants à l'orniérage ;
- Plus résistants à l'amorçage et à la propagation de fissures, à basse température ;
- Plus résistants à l'abrasion de surface due aux pneus, même après oxydation ;
- Plus résistants à la fissuration par fatigue (même si les améliorations sont moins marquées à des niveaux des déformations élevés) ;

- Moins sensibles aux dommages dus à l'eau ;
- Plus résistants à la dégradation oxydante, aux températures ambiantes.

Une série limitée d'essais de chaussée accélérés sur le béton bitumineux drainant (BBDR) époxy a montré des signes précoces d'abrasion de surface sur la section témoin, mais pas sur la section en époxy. Les sections soumises à des essais de chaussée accélérés ont indiqué que l'adhérence du bitume-époxy n'était pas sensiblement différente de celle d'un bitume traditionnel.

En résumé, les essais réalisés ont confirmé que le bitume-époxy était un excellent matériau, présentant de meilleures performances que les liants traditionnels. Les résultats des essais de bitumes époxy se sont avérés nettement supérieurs à ceux des matériaux traditionnels, sur les principaux indicateurs permettant d'évaluer le potentiel de longévité.

b. Enduit hydraulique fibré gravillonné (EHFG)

L'enduit hydraulique fibré gravillonné (EHFG) est un produit innovant, développé et testé pour la première fois dans des applications de revêtements routiers. Cette chaussée est constituée d'une mince couche de mortier fin fibré, à ultra hautes performances, dans laquelle sont enchâssées des particules dures de granulat, pour former une couche composite de 10 mm d'épaisseur.

La formulation initiale, conçue à partir des premières recherches, a été améliorée. Elle a été évaluée en fonction des propriétés déterminantes, à savoir : adhérence, fonction de liaison, protection des couches inférieures de la chaussée, comportement en fissuration, adhésion du mortier hydraulique avec le support bitumineux.

De manière générale, l'épaisseur de la couche en mortier fibré a été minimisée pour des raisons de coûts. En même temps, elle doit être suffisante pour permettre une bonne pénétration des gravillons dans le mortier frais.

La formulation a été améliorée en fonction des résultats des nombreux essais sur les matériaux, réalisés par les laboratoires. Dans une mince couche de surface en EHFG, des fissures discrètes risquent d'apparaître, sauf si la couche est adhérente à la couche de base. Toutefois, indépendamment du soutien assuré par la liaison avec la structure sous-jacente, des microfissures apparaîtront inévitablement, du fait du retrait hydraulique et des contraintes d'origine thermique. Pour que l'ouverture des fissures reste au niveau microscopique, un renforcement est nécessaire. La couche de mortier étant

mince, les recherches ont indiqué que des fibres d'acier devraient être ajoutées au mélange, pour répondre à ce besoin.

Le programme d'essais a été essentiellement réalisé en laboratoire et a porté sur les principales performances suivantes :

- Propriétés physiques générales de l'EHFG, notamment en ce qui concerne la liaison avec le support et la capacité à établir une adhésion durable du granulat avec la matrice ;
- Propriétés de ductilité et de fatigue ;
- Propriétés de durabilité sous l'effet de l'environnement ;
- Propriétés de surface, de bruit et d'adhérence.

Les essais sur la matrice concernant la résistance à la compression, la résistance à la traction et le module d'élasticité ont montré que le matériau pouvait être caractérisé par une résistance et un module élevés. Les résultats indiquent que les couches de roulement en EHFG présenteraient de bonnes propriétés de liaison et de durabilité. Ils confirment ainsi la réalisation des objectifs fixés.

En conclusion, les essais ont montré que l'EHFG avait une résistance et une intégrité élevées. Il est clair que certaines exigences restent à satisfaire (en particulier, couche inférieure résistante, bon enchâssement des gravillons), pour obtenir des performances optimales.

Par rapport au bitume-époxy, l'enduit hydraulique fibré gravillonné nécessite des développements complémentaires, concernant en particulier les techniques de mise en œuvre, avant son lancement sur le marché, en tant que revêtement à longue durée de vie.

Toutefois, les essais réalisés en phase II, en même temps que l'étude de formulation de l'EHFG, montrent que les incertitudes actuelles sur les applications de l'EHFG seront très probablement levées à l'avenir.

Au vu des essais réalisés et des performances mises en évidence, on considère que, si la couche d'EHFG se comporte bien pendant la ou les deux premières années, une dégradation générale est improbable dans les années suivantes. Ce revêtement devrait, au terme d'essais complémentaires, faire place à un produit final, caractérisé par une sécurité, un confort et une durabilité élevés, ainsi qu'un bruit limité.

Les deux types de revêtements de chaussées à longue durée de vie susmentionnés sont envisagés pour résoudre les problèmes des chaussées actuelles. En effet, ils ont été conçus pour une durée de service minimale de 30 ans.

L'un des deux matériaux à longue durée de vie, le bitume-époxy, a déjà démontré sa capacité à assurer une aussi longue durée de service, en tant que revêtement sur tabliers de ponts en acier. Les essais en laboratoire et les essais de charge accélérés ont confirmé que ce matériau possédait d'excellentes qualités sur les principaux indicateurs de performances permettant d'évaluer la longévité, tels que la rigidité et la résistance à l'orniérage, la fissuration à basse température, la fissuration par fatigue, l'abrasion de surface (même après oxydation) et la sensibilité aux dommages dus à l'eau.

L'autre matériau à longue durée de vie, l'enduit hydraulique fibré gravillonné, renforcé de fibres d'acier, représente une application nouvelle d'une classe de matériaux qui a déjà fait l'objet de nombreuses recherches à d'autres fins de construction. Les essais ont montré que ce matériau a une résistance exceptionnellement élevée, même lorsqu'il est utilisé, comme ici, pour un revêtement de chaussée extrêmement mince (seulement 10 mm). De nombreuses études ont été réalisées dans la conception du mélange de béton, afin d'obtenir une formulation qui ne serait pas sensible à la fissuration, puis de déterminer la meilleure façon d'assurer une liaison durable avec le support. D'autres recherches ont été effectuées pour insérer les granulats dans la matrice, afin d'assurer une bonne adhérence et d'obtenir des propriétés de frottement élevées pendant plusieurs dizaines d'années. Cet objectif a également été atteint. En résumé, l'EHFG a montré ses capacités de longévité grâce à des propriétés telles que la liaison avec le support, l'adhésion durable du granulat avec la matrice, la résistance à la fatigue, la durabilité sous l'effet de l'environnement et les caractéristiques de surface, notamment l'adhérence.

En conclusion, les deux matériaux, l'enduit hydraulique fibré gravillonné, renforcé de fibres d'acier, et le bitume-époxy, pourront très probablement apporter des solutions durables à la demande de revêtements pour les chaussées existantes, si celles-ci possèdent une longue durée de vie résiduelle.

2. Dalle hexagonales

En milieu urbain, les laboratoires imaginent des couches de roulement à la fois adhérentes, dépolluantes, silencieuses et des structures de chaussée modulaires, permettant d'inclure ou de faciliter l'accès aux différents réseaux. La forme la plus aboutie de cette technique de construction consistera en une route préfabriquée, ou routes modulaire, dont on vient retirer les parties défectueuses pour les réparer en conditions contrôlées en vue d'une réutilisation ultérieure.

Les structures préfabriquées et les techniques de construction automatisées sont de nature à faciliter l'intégration des nouvelles technologies et à autoriser des procédés de fabrication de meilleure facture car effectués en conditions contrôlées. Les avantages de telles approches sont des délais raccourcis de construction, maintenance et réparation, associés à des durées réduites d'intervention sur les voies de circulation. Cela a pour bénéfice des congestions amoindries et une sécurité accrue des ouvriers, notamment de nuit et en hiver. D'autres avantages sont liés à l'accès facilité aux différents réseaux ainsi qu'à l'évolutivité accrue de l'infrastructure pour recevoir des voies de bus, des voies de tramways ou encore des pistes cyclables. En outre, ces structures peuvent être équipées de couches de roulement à la fois plus silencieuses et présentant moins de résistance, tout en conservant des niveaux d'adhérence adéquats.

Par exemple, les chaussées urbaines démontables sont conçues pour être facilement ouvertes et refermées en une demi-journée environ, à l'aide d'un matériel léger et silencieux, afin de minimiser la gêne aux usagers et riverains occasionnée par les travaux d'entretien. « Modieslab » est une route à base de dalles préfabriquées en béton, construites à partir de deux couches de béton ouvertes posées sur une autre couche d'appui en béton, destinée à être ancrée par des fondations sur pieux. Une voie d'essai de 100 mètres a été réalisée aux Pays-Bas sur l'autoroute A12 près d'Utrecht, soit avec des conditions de trafic denses. Les résultats des tests ont démontré une déformation réduite, une réduction du bruit (6 dBA) et un écoulement rapide des eaux de pluie.

Dans la partie suivante, nous présenterons une technologie développée aux Etats-Unis qui combine cette composante de routes modulaires, productrices d'énergie et d'autres fonctionnalités...

3. Routes à énergie positif

Et si la route devenait une mine d'énergie renouvelable ? Ses surfaces ne sont-elles pas déjà là, sous nos roues, prêtes à recueillir l'énergie du soleil ? Si les kilomètres de linéaires de chaussées que nous avons étaient entièrement équipés de panneaux photovoltaïques ou d'une couche d'enrobé capable de capter et d'exploiter la chaleur du soleil, même avec un rendement de 10 %. Tout en garantissant que la surface de la chaussée continue de frotter au contact du pneumatique de manière à garantir la sécurité routière pour les voitures et les camions qui circulent, en réduisant les nuisances sonores. La chaussée doit continuer de résister aux passages des essieux. Avec ses équipements, elle doit durer dans le temps malgré les conditions météorologiques parfois sévères : pluie, neige, sécheresse etc.

Plusieurs compagnies ont été précurseur pour s'orienter vers ce domaine, citons par exemple le procédé Wattway ® de Colas en France, la piste cyclable Solar Road ® aux Pays-Bas ou même le prototype Solar Roadway ® aux États-Unis.... Dans ce qui suit, un benchmarking sera dressé.

a. Wattway ® de Colas

Colas, un des leaders mondiaux des infrastructures de transport, a développé en partenariat avec l'Institut National de l'Énergie Solaire (INES) un concept de revêtement routier photovoltaïque, Wattway. Cette innovation introduit une rupture technologique majeure, qui s'intègre dans les projets de route intelligente et de « smart city ».

Les dalles photovoltaïques, à la fois très fines et très résistantes, à forte adhérence et conçues pour durer, sont collées sur le revêtement existant des routes, autoroutes, pistes cyclables, parkings, etc., sans travaux de génie civil. Elles supportent la circulation de véhicules en toute sécurité, tout en produisant de l'électricité.

Chaque dalle comprend des cellules de 15 cm de côté constituant une très fine feuille de silicium polycristallin qui transforme l'énergie solaire en électricité. Extrêmement fragiles, les cellules photovoltaïques sont enrobées dans un substrat multicouches composé de résines et de polymères, suffisamment translucides pour laisser passer la lumière du soleil et assez résistants pour supporter la circulation de poids lourds. Ce « sandwich » composite est également conçu pour s'adapter aux dilatations thermiques de la chaussée. Quant à la surface au contact des roues des véhicules, elle est traitée pour fournir une adhérence équivalente à celle des enrobés routiers traditionnels.

Dans ce mille-feuille parfaitement étanche, l'architecture électrique est conçue de manière à éviter que la panne d'une seule cellule mette tout le panneau hors circuit.

Les raccordements électriques peuvent être intégrés sur les côtés des voies de circulation, dans les caniveaux ou dans de petites goulottes intégrées aux panneaux. Enfin, des disjoncteurs électroniques assurent la sécurité du dispositif.

Pour parler de la productivité de cette technologie, il est judicieux de présenter les horizons d'exploitation de cette énergie :

- L'éclairage public : 1000 mètres linéaires de chaussée Wattway permettent d'éclairer une ville de 5000 habitants (ADEME) ;

- L'alimentation des feux rouges, des panneaux à messages variables, etc.: 15 m² de dalles Wattway alimentent les feux d'un carrefour ;
- L'énergie pour les foyers alentour : 20 m² de dalles Wattway, soit 4 mètres linéaires de voirie, avec 1000 heures d'ensoleillement par an, suffisent pour alimenter un foyer français moyen (ADEME/CEREN 2014) ;
- La recharge des véhicules électriques à l'arrêt par induction : 100 m² de panneaux Wattway fournissent l'énergie nécessaire pour parcourir 100 000 km par an en véhicule électrique (INES).

b. Solar Roadway ® aux États-Unis

L'expérience Solar Roadway regroupe les avantages de l'expérience française dans la production d'énergie et l'idée de dalle amovibles. Cette innovation a été présentée par Scott Brusaw et sa femme, l'idée est la même : exploiter la surface de la route pour produire de l'énergie tout en intégrant la possibilité de l'interactivité avec les usagers.

L'innovation de Solar Roadway réside dans l'usage de boîtier hexagonal en verre au lieu des routes classiques. Les Brusaws ont dû rencontrer des ingénieurs en structure de l'Université de l'Idaho pour créer un boîtier durable transparent pour les cellules solaires à partir de bouteilles et de verre recyclés. Le résultat a été une boîte hexagonale transparente construite en verre pare-balles assez résistant pour supporter jusqu'à 113 tonnes. Les panneaux sont installés successivement et se verrouillent en place pour former un réseau, comme le montre la figure.



Ces cellules sont connectées via un réseau, et dès qu'une d'elles est endommagée, d'autres viennent informer la municipalité pour un éventuel entretien.

Le boîtier lui-même peut loger bien plus qu'une simple cellule solaire, ce qui en fait un modèle vierge pour une liste d'autres appareils qui pourraient se retrouver dans nos rues et nos autoroutes. Dans les régions froides où la neige et la glace peuvent s'accumuler sur les routes, des éléments chauffants pourraient être placés dans les panneaux afin d'accélérer la fonte de la neige. Des LED dans les cellules pourraient être utilisées pour éclairer les trottoirs, les voies de stationnement et les places publiques, ce qui rend ces espaces communs sécuritaires. Ces mêmes LED couplées à un microprocesseur, également dans la cellule, pourraient alerter les conducteurs des conditions de circulation routière en temps réel.

L'idée des Brusaws, est plus ambitieuse. Les perspectives sont encore plus prometteuses à long terme. En transformant les autoroutes en générateurs solaires, le réseau électrique lui-même peut être redéfini. Des pannes d'électricité généralisées seraient presque impossibles, car l'électricité serait fournie par un réseau de cellules plutôt que par des centrales électriques centralisées et sujettes aux dommages. Les poteaux téléphoniques et les fils électriques aériens, qui défigurent le paysage et deviennent dangereux pendant les vents et les tempêtes, pourraient être emportés hors du ciel et acheminés à travers un logement souterrain facilement accessible à l'accotement de toutes les routes solaires appelé corridor de câble. Avec l'électricité si abondante et accessible, les véhicules électriques deviendraient aussi pratiques que jamais, et grâce à la hausse de la production d'énergie locale des bornes de recharge pourraient être placées à n'importe quel coin de rue, parking ou station de services.

En conclusion, ces invitations ont été testées sur plusieurs sites et dans différents pays, et le résultat revient toujours le même : ce sont des solutions écologiques et qui réduisent l'empreinte de l'homme. Que ce cela concerne les routes résilientes, des dalles amovibles, des procédés d'exploitation des surfaces des routes pour la production de l'énergie ou autres innovations, il faut prendre l'initiative et s'atteler sur un projet pour que la marque de développement soit visible sur notre réseau routier.

Références

Solar Roadways: The future we have been looking for. By Brad Hartwing.

Wattway Faisons de la route l'énergie de demain.

Les routes de la cinquième génération (R5G). L'IFSTTAR.

Des chaussées à longue durée de vie pour routes à forte circulation. Centre de recherche sur les transports.