

CHAUSSÉES HORS GEL ET RÉCUPÉRATRICES D'ÉNERGIE

Les préoccupations croissantes pour des routes ouvertes tout temps ou à énergie positive ouvrent des perspectives pour l'étude des chaussées chauffantes et récupératrices d'énergie solaire thermique. Le prototypage d'un échangeur de chaleur obtenu par la circulation d'un fluide caloporteur au sein d'une couche de liaison poreuse d'une chaussée est présenté dans cet article.



Pose de l'étanchéité à base de feuilles d'asphalte renforcées sous la couche de liaison drainante.

AUTEURS

Sarah Asfour

Doctorante
Département Laboratoire de Clermont-Ferrand,
Cerema Centre-Est

Frédéric Bernardin

Chercheur
Département Laboratoire de Clermont-Ferrand,
Cerema Centre-Est

Alexandre Cuer

Directeur adjoint
Département Laboratoire de Clermont-Ferrand,
Cerema Centre-Est

Margaret Herbaux

Responsable thématique
« Risques mouvements de terrain et géothermie »
Département Géosciences et Risques,
Cerema Ile-de-France

Mario Marchetti

Chargé de recherche
Laboratoire régional de Nancy
Cerema Est

Jean-Michel Piau

Ingénieur général des Ponts,
des Eaux et des Forêts
Département Matériaux et structures
Ifsttar

Sous l'impulsion du Grenelle de l'Environnement (2007) et, plus récemment, de la loi relative à la transition énergétique (2015), il est devenu nécessaire d'intégrer, lors de la phase de conception des chaussées et de dimensionnement mécanique, la considération de critères concernant l'économie de ressources non renouvelables, la réduction des émissions de gaz à effet de serre (GES) ou encore la préservation de l'environnement en phase d'exploitation. Le concept de route à énergie positive émerge également depuis peu, comme en témoigne le plan national sur 5 ans annoncé lors de la COP 21 en décembre 2015, avec l'objectif notamment de construire 1 000 km de routes de ce type sur le territoire français.

À titre illustratif, en considérant une énergie solaire moyenne sur le territoire français de 1 400 kWh/m²/an, le seul réseau routier national capte 196 milliards kWh/an, soit 7 fois plus d'énergie que nécessaire pour assurer par exemple un maintien hors gel en surface.

Aussi, sous l'impulsion du projet européen FOR (*Forever Open Road*) et sa déclinaison française R5G (Route de 5^e génération), l'Ifsttar (Institut français des sciences et technologies des transports, de l'aménagement et des réseaux), le Cerema (Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement), l'EATP

(École d'application aux métiers des travaux publics), le Stac (Service technique de l'aviation civile) et la société Total ont engagé conjointement, en 2013, l'action de recherche Chaussée à surface hors gel pour développer un démonstrateur de route chauffante par circulation d'un fluide caloporteur dans une couche de liaison poreuse de la chaussée.

CONCEPT

Le concept de chaussée chauffante n'est pas nouveau et a donné lieu à des réalisations sur sites publics ou privés dans différents pays.

L'une des plus notables est la chaussée du pont du Serso construite en Suisse, d'une surface de 1 300 m² : un fluide caloporteur, qui tire son énergie du sol par des sondes verticales de 65 m, circule dans des tuyaux insérés dans la couche de roulement de la chaussée¹.

Ces réalisations restent limitées en nombre et en surface traitée, en raison des surcoûts et contraintes engendrées par leur construction et leur exploitation.

Les travaux présentés dans cet article s'inscrivent dans le programme R5G de l'Ifsttar et du Cerema. Ils concernent un procédé innovant de chaussée

chauffante, fondé sur l'utilisation d'une couche de liaison en enrobés bitumineux poreux permettant la circulation de fluide caloporteur sous écoulement gravitaire (dévers, pente longitudinale).

La solution présente l'avantage, par rapport à celles qui utilisent des tubes de circulation insérés dans les chaussées, de ne reposer que sur des procédés usuels de fabrication et mise en œuvre de matériaux routiers.

La question de l'alimentation du fluide caloporteur en énergie, pour laquelle diverses solutions usuelles ou également innovantes peuvent être envisagées en fonction du contexte d'implantation de la chaussée (rase campagne, milieu urbain...), est considérée résolue indépendamment.

Le dispositif de chaussée à couche de liaison poreuse peut également être utilisé pour récupérer de la chaleur par temps chaud ou ensoleillé. Associée à une fonction de stockage géothermique, cette chaleur pourrait alors être conservée et rendue disponible en période froide afin d'obtenir des chaussées hors gel auto-suffisantes en énergie (figure 1).

DÉVELOPPEMENT DE L'INNOVATION

Il s'est fait en plusieurs étapes, à commencer par des études sur matériaux et maquettes en laboratoire, destinées à évaluer, à température ambiante ou en conditions hivernales, le fonctionnement thermo-hydraulique d'une couche d'enrobé poreux prise « en sandwich » entre deux matériaux imperméables.

ÉTUDES D'ÉCOULEMENT EN LABORATOIRE

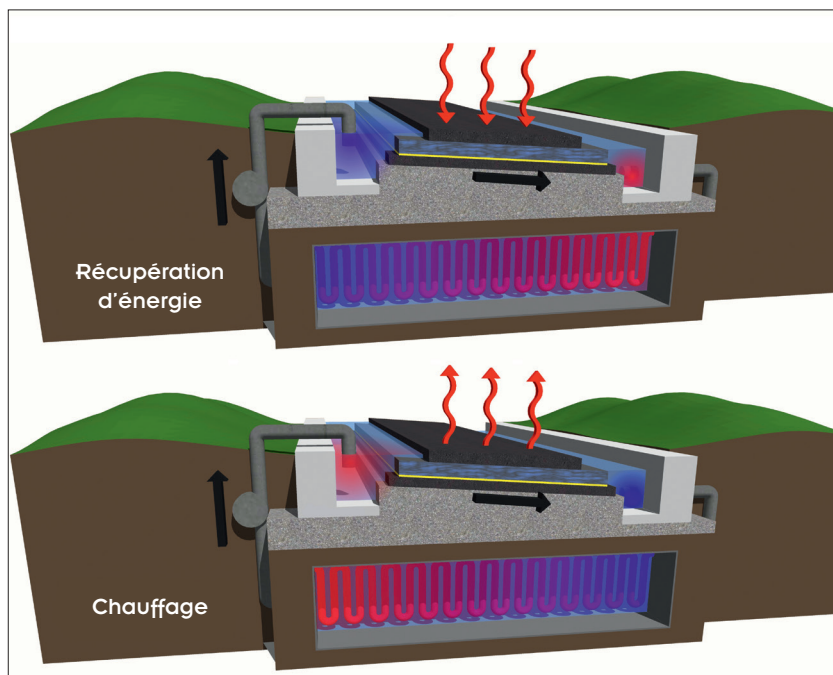
Une maquette tricouche de dimensions 0,8 x 1 m² a été construite avec, de haut en bas :

- une couche de roulement en béton bitumineux semi-grenu (BBSG) d'épaisseur 6 cm ;
- une couche de liaison d'enrobé drainant (béton bitumineux drainant (BBDR) 0/14 de 8 cm d'épaisseur ;
- une couche de base d'enrobé à module élevé (EME) de 5 cm d'épaisseur.

Deux plaques de plexiglas en amont et en aval ont permis de construire deux réservoirs pour l'alimentation et la récupération du fluide circulant dans la couche de liaison. Une pompe de relevage prélève le fluide du réservoir aval et le réinjecte dans le réservoir amont. Grâce au réglage de la pompe, différents régimes hydrauliques stationnaires, correspondant à différentes pertes de charges hydrauliques entre bacs amont et aval, peuvent être atteints. La circulation du fluide est maintenue dans la couche drainante grâce à une étanchéité réalisée entre celle-ci et la couche sous-jacente (figure 2).

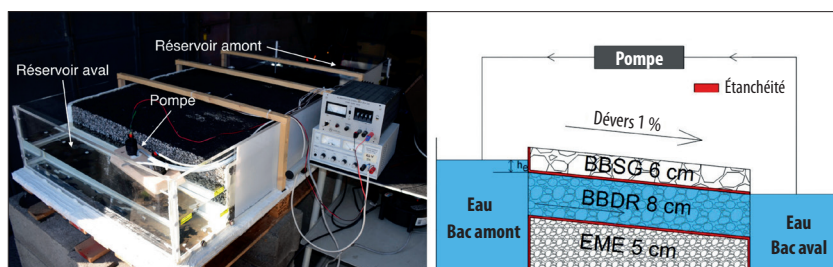
-Figure 1-

Schéma de principe de l'innovation, avec stockage géothermique et boucle de circulation fluide pour une chaussée hors gel énergétiquement autonome.



-Figure 2-

Maquette de laboratoire et son principe d'expérimentation hydraulique.



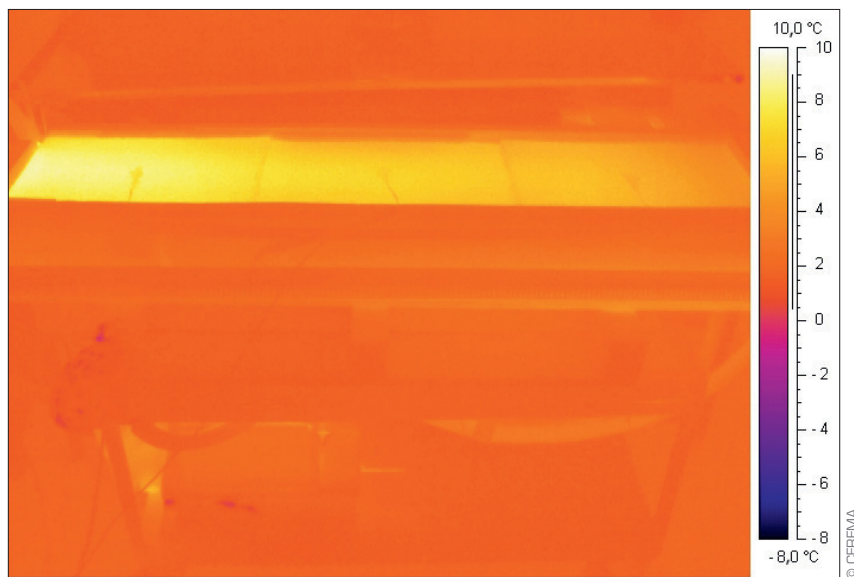
Les résultats expérimentaux ont été confrontés à divers modèles d'écoulement hydrauliques, à saturation ou à surface libre dans la couche poreuse. Des modèles de Darcy ont pu être validés avec l'identification d'une conductivité hydraulique à saturation de 2,2 cm/s².

ESSAIS EN ENCEINTE CLIMATIQUE

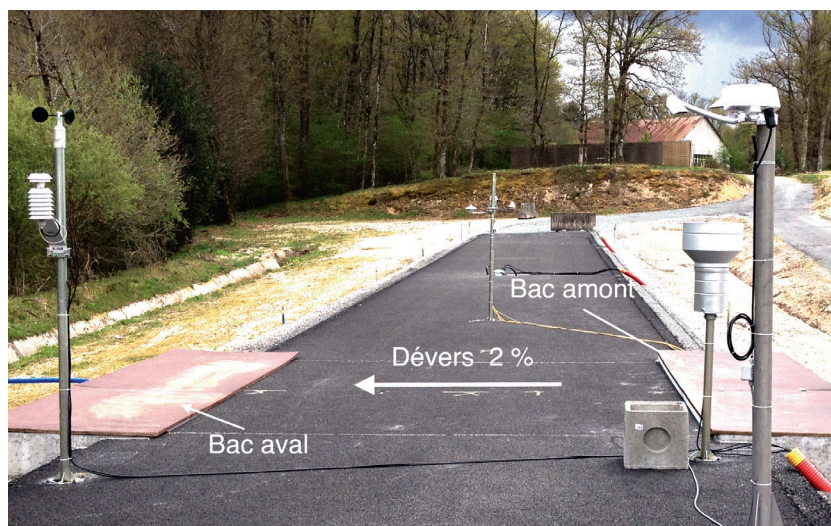
Une maquette de dimension légèrement supérieure en longueur a été soumise à des conditions hivernales contrôlées en caisson climatique (température négative jusqu'à - 10 °C, présence de vent, précipitations). L'objectif était de vérifier la capacité de l'écoulement du fluide caloporteur à maintenir une température en surface pour empêcher la formation de verglas et l'accumulation de neige.

Le suivi effectué par thermographie infrarouge (figure 3) montre le gradient négatif de température le long de la maquette, mais avec une valeur de température restant positive en tout point. En s'écoulant, le fluide se refroidit et a un pouvoir de chauffage qui s'amenuise.

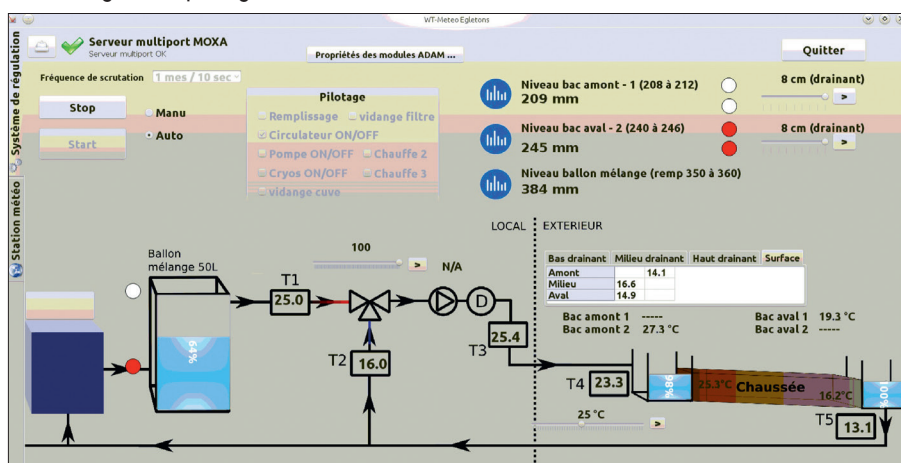
-Figure 3-
Maquette de laboratoire en caisson climatique et réponse thermique en infrarouge.



-Photo 1-
Démonstrateur d'Égletons.



-Figure 4-
Logiciel de pilotage du démonstrateur.



ESSAIS SUR DÉMONSTRATEUR

Sur la base de ces résultats de laboratoire encourageants, un démonstrateur de chaussée chauffante à couche de liaison poreuse a été réalisé à échelle 1 sur le site de l'EATP d'Égletons afin de :

- tester la mise en œuvre de l'innovation par des techniques classiques de construction de chaussée ;
- éprouver l'innovation avec des caractéristiques géométriques de route réelle et sous climat naturel ;
- grâce à son instrumentation :
 - évaluer le potentiel de récupération d'énergie solaire thermique en période chaude ;
 - évaluer l'énergie et la puissance de chauffage nécessaires au maintien hors gel de la surface de chaussée ;
 - développer des modèles pouvant rendre compte de ces énergies ;
 - valider expérimentalement les modèles.

MISE EN ŒUVRE ET EXPLOITATION DU DISPOSITIF

Le démonstrateur et son instrumentation (**photo 1**) ont été mis en œuvre en 2013-2014.

La chaussée, d'une longueur de 50 m et d'une largeur de 4 m, de pente nulle et de dévers 2 %, est constituée de trois couches : la couche de liaison est un enrobé drainant reposant sur une chape d'étanchéité de type ouvrages d'art pour la partie où circule le fluide (zone B), la zone témoin sans fluide (zone A) n'ayant pas d'étanchéité.

L'instrumentation est constituée de jauges de température placées dans les bacs amont et aval, ainsi que sur des profils verticaux situés dans la chaussée en parties amont, médiane et aval de l'écoulement.

Sont également enregistrés la température de l'air extérieur à 2 m du sol, le flux solaire incident et les précipitations.

Un dispositif de régulation hydraulique et thermique (**figure 4**) opérable à distance permet d'injecter dans la couche de liaison un fluide (eau) à une température déterminée tout en régulant son débit. Il assure ainsi l'acquisition des paramètres de la chaussée (température, état de surface, débit du fluide) et des paramètres atmosphériques.

Il s'agit d'une version prototype, dont le programme de commande est destiné à évoluer vers un logiciel de contrôle/commande de consommation ou récupération d'énergie de ce type de chaussée.

Le démonstrateur est opérationnel depuis juin 2015. Deux fonctions du système ont été étudiées depuis cette date :

- fonte de neige en surface ;
- récupération d'énergie en période chaude.

Pour la fonction « chauffage », le fluide (eau) est porté à une température fixée par l'utilisateur à l'aide d'une chaudière électrique. Il est prévu, au cours de l'année 2017, de coupler la chaussée avec un système de géothermie très basse température associée à une PAC (pompe à chaleur) en remplacement de la chaudière actuelle.

ÉVALUATION DU DISPOSITIF EN PÉRIODE NEIGEUSE

Un épisode neigeux a eu lieu sur le site du démonstrateur le 18 janvier 2016 entre 9 h 30 et 20 h 30. L'intensité et la hauteur de neige tombée relevées par les capteurs sont représentées dans la **figure 5**. Il s'agit d'une neige faible de l'ordre de 0,5 mm/h. Sur la **photo 2**, la zone dans laquelle l'eau circule dans la couche de liaison poreuse de la chaussée reste noire.

La **figure 6** représente les températures enregistrées : dans les bacs amont et aval, en surface de chaussée (amont, milieu, aval) de la zone B, en surface de chaussée témoin de la zone A, et dans l'air. On constate :

- une température de surface de la zone témoin aux alentours de 0 °C, la chaussée étant recouverte de neige ;
- des températures de surface positives pour la zone B, avec une diminution de l'amont vers l'aval, comme observé sur la maquette de laboratoire ;
- une chute importante de la température de surface en zone B lors du début de l'épisode neigeux, puis une stabilisation relative entre 5 °C et 10 °C ;
- une perte de température du fluide d'environ 10 °C entre le bac amont et le bac aval.

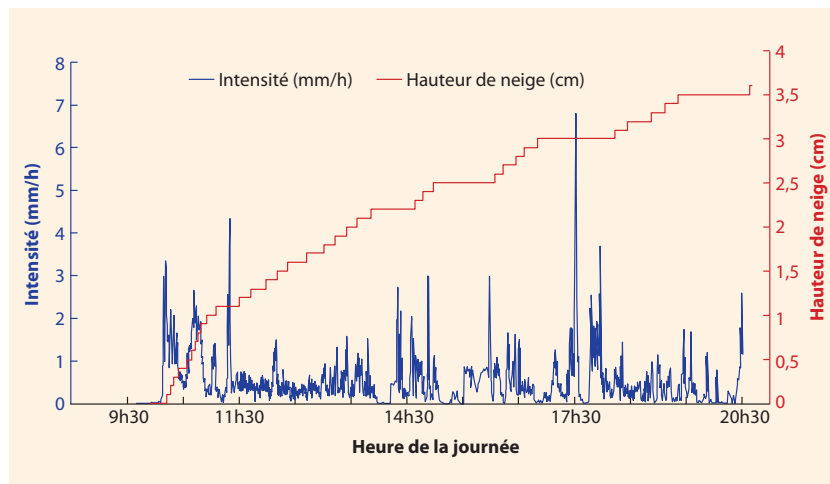
On déduit de la perte de température du fluide et du débit d'écoulement une énergie de chauffage transférée vers la chaussée de 92 MJ sur 11 h, soit, pour les 16 m² de la zone B, une puissance moyenne développée de 145 W/m². Cette valeur se situe dans la fourchette 100-600 W/m² rapportée dans la littérature¹ pour la fonte des neiges de quelques mm/h sur la base des solutions plus usuelles avec circulation de fluide par tubes ou résistances électriques insérés dans la couche de roulement.

ÉTUDE DE LA RÉCUPÉRATION D'ÉNERGIE

Une deuxième série de mesures a porté sur l'étude de la récupération d'énergie par le démonstrateur. Cette énergie produite par le réchauffement de la chaussée par temps chaud ou ensoleillé résulte globalement de l'énergie solaire (tout en pouvant être décomposée en rayonnement direct ou indirect ou en échange de chaleur par conduction/convection avec l'air et le milieu environnant).

—Figure 5—

Intensité de précipitation et hauteur de neige enregistrées le 18 janvier 2016.



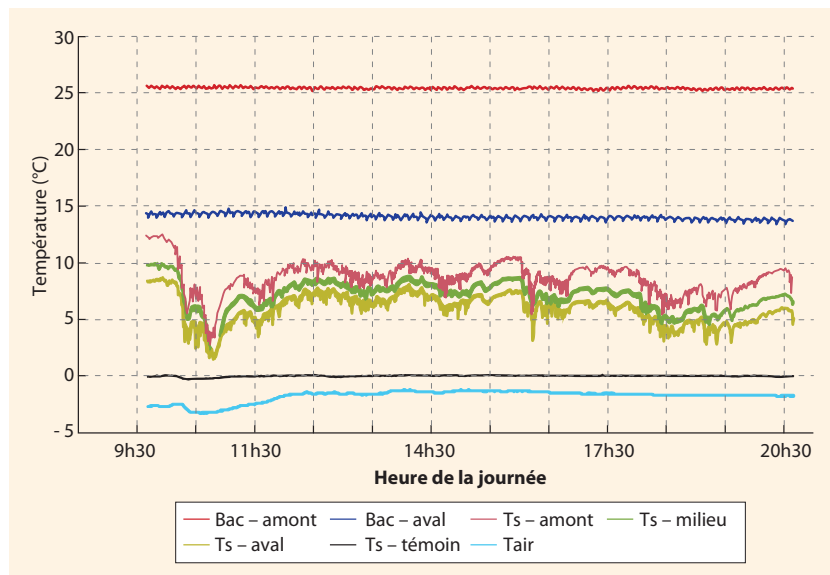
—Photo 2—

Prise de vue pendant l'épisode neigeux du 18 janvier 2016.



—Figure 6—

Températures enregistrées entre 9h30 et 20h30 le 18 janvier 2016.



Les mesures ont été relevées entre les 10 et 28 juillet 2015 afin d'étudier le gain de température du fluide lorsqu'il circule à travers la chaussée entre l'amont et l'aval. Il convient de préciser que le fluide circule en circuit fermé (l'eau relevée dans le bac aval est réinjectée dans le bac amont). Au cours de cette période, le rayonnement solaire a atteint certains jours plus de 1 000 W/m². L'énergie solaire totale apportée sur la période vaut 400 MJ/m².

La **figure 7** représente la température moyenne du fluide sur la hauteur de la couche poreuse depuis son injection jusqu'à sa sortie.

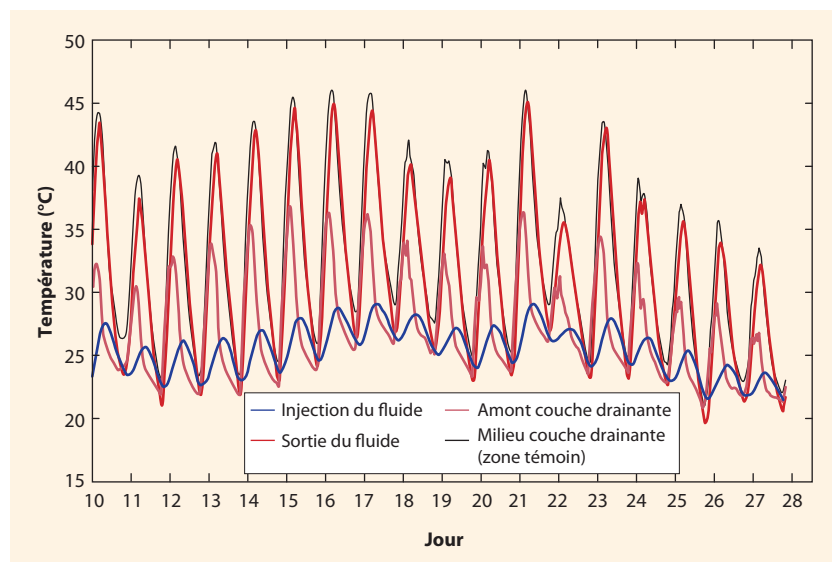
Les mesures mettent clairement en évidence l'effet de l'alternance jour/nuit sur la température du fluide. Par ailleurs, les valeurs maximales de température montrent un réchauffement important entre l'amont et l'aval, le fluide ayant atteint à sa sortie la température de la chaussée en zone témoin.

Cette différence de température permet le calcul de l'énergie captée à travers la couche drainante. Compte tenu du débit linéique égal à environ 50 l/h mesuré lors de ces essais, l'énergie thermique récupérable est évaluée à 130 MJ/m², ce qui, rapporté à l'énergie solaire reçue par la surface de la zone B (400 MJ/m²), conduit à un rendement de 32 %.

Il faut toutefois noter que la quantité d'énergie qui peut être récupérée est fonction, par nature, de la température d'injection du fluide : elle est nulle pour un fluide à température initiale égale à celle de la zone témoin et croît d'autant plus que la température d'injection est basse. Il est notamment d'intérêt, pour accroître le taux de récupération et pour des longueurs de chaussée plus importantes, d'injecter le fluide à une température suffisamment basse pour éviter sa « saturation » en température et ne pas limiter ainsi sa « prise » de calories.

—Figure 7—

Température du fluide à son injection, en amont de la couche poreuse, à sa sortie, et température en zone B (témoin) pour la période estivale du 10 au 28 juillet 2015.



MODÉLISATION THERMO-HYDRAULIQUE

Sur la base de ces résultats expérimentaux, des modèles thermo-hydrauliques du démonstrateur ont été développés et validés. Ils permettent notamment de calculer un taux de récupération d'énergie solaire de 31 % du démonstrateur (évalué à 32 % expérimentalement) et donc d'extrapoler à d'autres configurations l'évaluation des quantités énergétiques récupérables ou nécessaires au maintien hors gel (**tableau 1**), en fonction :

- des propriétés des matériaux : paramètres thermiques et hydrauliques, porosité de l'enrobé drainant... ;
- des paramètres géométriques de la chaussée : hauteur de couches, largeur, dévers... ;
- de la température d'injection du fluide et du débit ;
- de la météorologie locale.

—Tableau 1—

Taux de récupération d'énergie solaire estimé pour une température d'injection de 10 °C.

Longueur d'écoulement (m)	Débit (l/h)	Taux de récupération (%)
4	62,5	52
4	125	60
4	187,5	63
4	250	66
7	62,5	54
7	125	80
7	187,5	91
7	250	96

© CEREMA

À titre d'exemple, les résultats du tableau 1 montrent les taux de récupération d'énergie attendus pour 2 largeurs de chaussée (4 et 7 m) et différentes valeurs de débit, qui, à conductivité hydraulique fixée, pourraient être obtenues par modification des charges hydrauliques amont et aval. Les calculs indiquent ainsi qu'une température d'injection inférieure (par exemple, 10 à 15 °C) à celle expérimentée sur le démonstrateur (25 °C), qui pourrait résulter d'un fonctionnement en boucle avec restitution d'énergie et refroidissement à travers une sonde géothermique (*geocooling*) peu profonde, conduirait à des taux de récupération pouvant dépasser 90 %.

DURABILITÉ DE LA SOLUTION

En complément des résultats obtenus, il est important de souligner qu'aucune dégradation des matériaux du démonstrateur (désenrobage, par exemple) n'a été signalée sur l'ensemble des périodes de fonctionnement avec circulation d'eau. Cette observation reste toutefois à conforter sur des planches d'essais soumises à des conditions

plus sévères d'utilisation, en présence notamment de charges de trafic poids lourds. Par la même occasion, ces essais devront être réalisés avec des fluides caloporteurs additionnés d'antigel alimentaire, afin de sécuriser l'intégrité mécanique des chaussées en cas de dysfonctionnement du dispositif de maintien hors gel. De tels essais sont envisagés sur le site de l'Ifsttar à Nantes, qui dispose des machines de chargement accéléré FABAC (fatigue du béton armé continu).

Au besoin, une optimisation du triplet fluide/bitume/granulat des enrobés pourra également être recherchée en laboratoire.

CONCLUSION

Les résultats sur démonstrateur ont montré le potentiel des couches de liaison poreuses pour la réalisation de chaussées hors gel ou récupératrices d'énergie et ont permis de proposer des modèles numériques calés, afin d'établir le dimensionnement thermo-hydraulique de telles installations pour des conditions géométriques et climatiques variées.

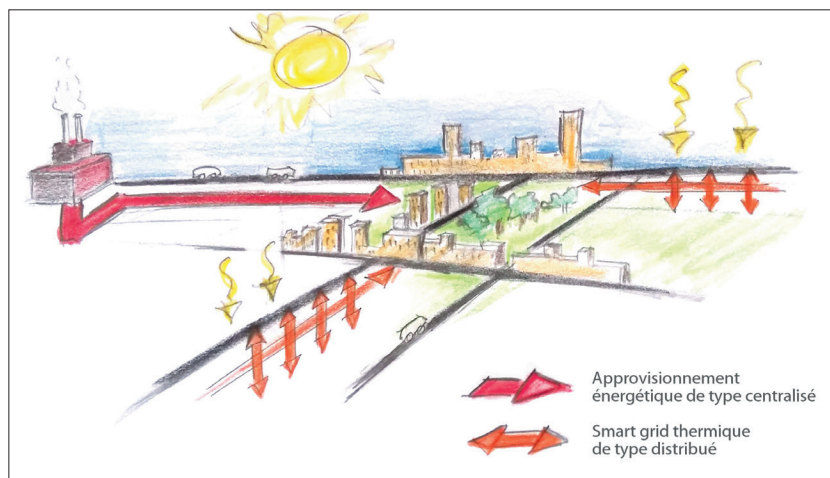
Des études expérimentales sur planches d'essai soumises à l'effet du trafic restent à entreprendre pour vérifier la tenue mécanique à long terme de matériaux et structures traversées par d'importantes quantités de fluide.

Les applications potentielles de cette innovation en tant que chaussée hors gel sont les mêmes que celles généralement mentionnées à propos de ces dernières :

- déploiement sur sites routiers particulièrement sensibles aux effets du gel, du fait d'un risque d'accidents accru ou d'une diminution importante de viabilité (rampes, ponts, voiries d'accès aux services d'urgence hospitalière...);
 - équipement d'aires difficiles à traiter, sans entrave à leur exploitation, par les procédés usuels de viabilité hivernale (plates-formes aéroportuaires à fort trafic, aires de péage, aires industrielles, aires de parking...);
 - installation au voisinage de zones environnementales sensibles, demandant à limiter l'emploi de fondants routiers (présence de plans d'eau...).
- La conception de ce type d'installation ne peut se faire sans y intégrer le volet énergétique nécessaire à leur fonctionnement et à leur exploitation. La géothermie basse énergie, qui est devenue d'un emploi courant, est l'une des solutions possibles sur site isolé.

—Figure 8—

Smart grid thermique pour un quartier.



© CEREMA

En milieu urbain ou péri-urbain, des solutions plus variées, fondées sur un raccordement aux réseaux de chaleur ou sur un couplage énergétique avec le bâti environnant, peuvent être envisagées.

La fonction de capture d'énergie peut quant à elle être utilisée en combinaison ou indépendamment de celle de chaussée hors gel.

En cas de chaussée hors gel avec boucle géothermique, l'un des objectifs serait, comme pour le pont du Serro mais à une échelle plus réduite, de stocker et réinjecter les calories capturées en surface dans le sol afin d'éviter son refroidissement à long terme. Pour le démonstrateur d'Égletons, plusieurs solutions sont envisageables, mais au vu des terrains rocheux (granite) présents au droit du site et de la surface utilisable limitée, les sondes géothermiques verticales semblent être plus appropriées.

Dans les sites industriels ou urbanisés, les sections de route à énergie positive pourraient être intégrées à de véritables réseaux de chaleur intelligents, ou *smart grid* thermiques, disposant d'un contrôleur d'énergie, au même titre que les *smart grid* associées aux réseaux électriques. L'énergie récupérée pourrait alors contribuer à l'approvisionnement énergétique de zones industrielles ou quartiers de ville (figure 8). ■

RÉFÉRENCES

1. W. J. Eugster, *Road and Bridge Heating Using Geothermal Energy. Overview and Examples*, Proceedings European Geothermal Congress 2007, Unterhaching, Allemagne, 30 mai-1^{er} juin 2007.
2. S. Asfour, F. Bernardin, E. Toussaint, J.-M. Piau, « Hydrothermal modeling of porous pavement for its surface de-freezing », *Applied Thermal Engineering*, vol. 107, pp. 493-500, 2016.

Remerciements

Les auteurs remercient tout particulièrement Malek Abdi, Jean-Luc Bicaud, Frédéric Chastanet, Jean Dumoulin, Thomas Gabet, Laurence Lapalu, Nicolas Le Touz, Philippe Morange, Damien Mounier et Évelyne Toussaint pour leur collaboration active au projet.