

Dégâts hivernaux subits sur chaussées et comportement au gel/dégel des enrobés bitumineux

C. Mauduit, S. Liandrat, E. Crégut, G. Bertuit*
Laboratoire des Ponts et Chaussées de Clermont-Ferrand, France
* Université de Clermont-Ferrand, stage de Master
Caroline.Mauduit@developpement-durable.gouv.fr

O. Chupin, F. Hammoum, J.-M. Piau
IFSTTAR, France
olivier.chupin@developpement-durable.gouv.fr

ABSTRACT

Certains récents hivers, comme l'hiver 2009/2010 ont donné lieu dans le nord et l'est de la France ainsi que dans les régions limitrophes (sud de l'Angleterre, Belgique, ouest de l'Allemagne,...), à d'importants dégâts en partie supérieure de chaussée. Ceux-ci se manifestent principalement par la formation de nids de poule en chapelets, qui ont la particularité d'apparaître subitement et quasi-simultanément sur de grands linéaires. Des sections routières ou autoroutières de plusieurs dizaines de kilomètres de long ont ainsi été touchées au cours d'une même journée, allant parfois jusqu'à entraîner une fermeture immédiate au trafic des voies les plus affectées. La gêne aux usagers s'est doublée par ailleurs d'importants coûts de réparation, non prévus au titre des programmes d'entretien courant.

Ces évènements ont conduit les services routiers français à engager diverses actions d'étude afin de comprendre le phénomène, pouvoir y remédier et éviter la survenue de tels désordres dans l'avenir.

Ces actions comportent des analyses de terrain détaillées de la pathologie observée et des circonstances d'apparition des dégâts.

Sur la base de ces retours de terrain, qui montrent l'importance du rôle de la combinaison « eau/froid », le Réseau Scientifique et Technique et l'IFSTTAR ont également lancé un programme d'essais en laboratoire sur le comportement au gel/dégel des enrobés bitumineux, préalablement saturés en eau. Ces essais s'inspirent pour partie de ceux pratiqués pour juger de la gélivité des matériaux granulaires non liés, utilisés en couche de chaussée. Les mesures montrent des effets manifestes de « déformation parasite », liés aux changements de phase liquide/solide de l'eau contenue dans l'espace poreux des matériaux testés. Ceux-ci pourraient être à l'origine des problèmes rencontrés.

On présente dans cet article les principaux résultats de laboratoire obtenus et les pistes d'explication du phénomène, proposées à partir de ces observations.

1. Introduction.....	2
2. Recherche du mécanisme déclencheur : ANALYSE initiale	3
3. ESSAIS de GEL/DEGEL en laboratoire SUR ENROBES BITUMINEUX.....	4
3.1 Description de l'essai	4
Dispositif d'essai.....	4
Mesures des températures	5
Mesures de déformation	6

3.2	RESULTATS D'ESSAI SUR ENROBE SEC	7
3.3	RESULTATS D'ESSAI SUR ENROBE SATURE A 72%	8
4	Quels impacts pour la chaussee ?	9
	Conclusion	10
	REFERENCES	11

1. INTRODUCTION

Depuis l'hiver 2002/2003, on a pu assister non seulement dans le nord et l'est de la France, mais aussi dans les zones géographiques limitrophes (sud de l'Angleterre, Belgique, ouest de l'Allemagne,...) à l'apparition de désordres dans les chaussées, se produisant sans signe précurseur spécifique et en des laps de temps très réduits de l'ordre de quelques heures seulement [1]. Ces dégradations se traduisent généralement par des séries de nids de poule, voire des « départs en plaque » ou « pelade » de la couche de roulement apparaissant majoritairement en bandes de roulement et pouvant conduire à fermer en urgence au trafic, les voies les plus affectées (figure 1). Au cours d'un même épisode, l'étendue des zones touchées semble à l'échelle des zones soumises à de mêmes conditions météorologiques, caractérisées par des températures relativement froides (au dessous de -10°C) précédées de périodes à température positive avec précipitations pluvieuses.

Devant les conséquences souvent importantes en terme de gestion de trafic, sécurité et coûts d'intervention et de réparation, les autorités françaises ont interpellé la communauté scientifique et technique afin d'analyser le phénomène et le comprendre, dans le but d'évaluer les risques de désordres sur les sections non touchées à ce jour et de dégager des règles de construction ou réparation permettant de s'en prémunir à l'avenir. Une partie de ces recherches est inscrite dans l'opération de recherche de l'IFSTTAR(CCLEAR) dédiée de façon générale à l'impact des événements climatiques sur les chaussées.



Figure 1. *Chapelets de nids de poule apparus en quelques heures*

Le caractère à la fois soudain et géographiquement étendu des épisodes conduisant en quelques heures à la dégradation de centaines de kilomètres de chaussée en linéaire cumulé, démontre sans nul doute l'existence d'un mécanisme d'endommagement franc et brutal, différent de ceux habituellement rencontrés en Mécanique des Chaussées. Les très courtes durées sur lesquelles surviennent ces épisodes excluent en particulier des origines liées à des phénomènes de fatigue mécanique ou environnementale (thermique)

ou encore de désenrobage à long terme, se produisant à des échelles (pluri-)annuelles. Il n'est cependant pas impossible que le phénomène incriminé agisse préférentiellement sur des chaussées déjà « fatiguées » et se comporte comme un révélateur d'un état structural dégradé.

Mais pour pouvoir confirmer ou exclure cette hypothèse, il s'avère d'abord nécessaire d'identifier précisément le mécanisme en question et d'en évaluer la « puissance ». Quels en sont les facteurs et quelles sont les relations de causes à effets mises en jeu ? Est-il seul capable d'engendrer des désordres ou ne fait-il que donner le coup de grâce à une situation de toute façon promise à la ruine à brève échéance ?

C'est pour répondre à ces questions qu'il a été décidé de lancer un programme de recherche spécialement dédié à l'identification du mécanisme et à son étude. Nous donnons ci-après un premier aperçu des travaux réalisés et des résultats obtenus.

2. RECHERCHE DU MÉCANISME DÉCLENCHEUR : ANALYSE INITIALE

Les désordres observés sur le réseau routier français ont donné lieu à de nombreuses investigations, comprenant la compilation des relevés météorologiques précédant les épisodes critiques, le recensement des structures touchées et quelques carottages au voisinage des zones dégradées.

Ces études ont permis de mettre en évidence un certain nombre de facteurs communs aux cas d'apparition de désordres observés [2].

Sur le plan météorologique, les épisodes concernés s'inscrivent à la suite de journées marquées par des alternances de températures positives et négatives avec présence de précipitations pluvieuses. Les épisodes eux-mêmes semblent déclenchés par l'atteinte de températures atmosphériques plus froides aux environs de -10°C .

Les chaussées les plus touchées sont souvent des chaussées ayant subi un ou plusieurs entretiens avec superposition d'anciennes et nouvelles couches de surface. Dans ce cas les carottages effectués montrent que la source des désordres se situe généralement au niveau des anciennes couches de surface, qui apparaissent en grande partie désagrégées (fig. 2). En même temps, ces carottages révèlent la présence d'eau à l'intérieur de la porosité des enrobés de surface.

Si pour les raisons déjà mentionnées, il est possible d'écarter une origine de type « fatigue » aux désordres observés (ou tout au moins à leur déclenchement), ces constatations de terrain peuvent conduire à s'interroger en revanche sur une fissuration d'origine purement thermique des enrobés, susceptible d'engendrer des ruptures brutales au-delà d'un certain seuil de température négatif.

Mais les températures atmosphériques incriminées semblent à cet égard insuffisamment basses pour que tel soit le cas, compte tenu des classes de bitume utilisées en France. On peut l'attester à la fois de l'expérience commune qui montre que les chaussées résistent généralement assez bien à des températures de l'ordre de -10°C et des essais de laboratoire de type « retrait empêché ». Ceux-ci montrent que du fait de leurs propriétés de relaxation, les enrobés bitumineux usuels, refroidis à déformation nulle suivant des rampes de températures négatives de l'ordre de quelques degrés/heure, ne rompent guère pour des températures au-dessus de -20°C .

C'est pourquoi nos soupçons se sont plutôt portés vers un effet combiné de température négative et de présence d'eau dans la porosité des enrobés et nous ont conduit à initier un

programme d'essais en laboratoire destiné à investiguer cet aspect du comportement des matériaux bitumineux, non abordé dans la littérature technique.

Nos premiers essais se sont inspirés des essais de gonflement au gel des sols développés en France et à l'étranger dans le but d'évaluer les risques de déformation et d'altération des sols naturels ou des matériaux granulaires d'apport, sous l'effet des cycles de gel/dégel [2], [3].

Nous donnons dans la suite un aperçu de ces travaux et des résultats obtenus, qui vont dans le sens, sans complètement le démontrer à ce stade, d'un confortement de l'hypothèse d'une combinaison d'effets particulièrement nuisibles entre gel/dégel et la présence d'eau au sein des couches de chaussée bitumineuses.



*Figure 2 : Carotte prélevée au voisinage d'un nid de poule
Désagrégation des anciennes couches de surface*

3. ESSAIS DE GEL/DEGEL EN LABORATOIRE SUR ENROBES BITUMINEUX

3.1 DESCRIPTION DE L'ESSAI

Dispositif d'essai

L'installation d'essai permet de congeler de façon « unidimensionnelle » des échantillons cylindriques du (des) matériau(x) à tester : sols, graves non traitées ou en l'occurrence enrobés bitumineux. Elle comporte 6 cellules permettant de tester simultanément autant d'échantillons différents, les six cellules étant immergées dans une cuve contenant un liquide réfrigéré à température légèrement positive (1 à 2°C) (fig.3). Les cycles de gel/dégel sont appliqués en surface des éprouvettes par contact avec un piston métallique

réfrigéré, piloté par un cryostat. Il est possible d'immerger la base des éprouvettes dans une nappe phréatique à 1 ou 2°C, pour fournir une source d'eau pendant les phases de gel et étudier les succions capillaires et cryogéniques susceptibles de se développer. Les essais présentés dans cet article ont été réalisés sans nappe.

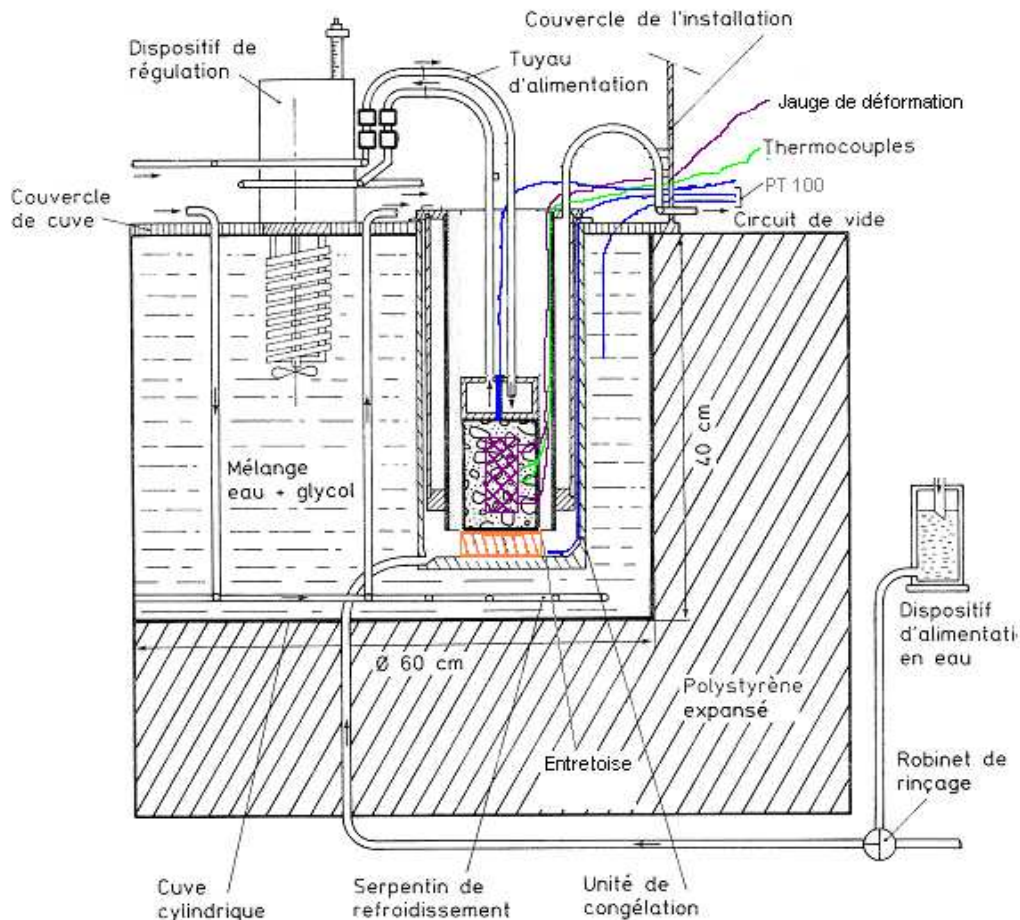


Figure 3 : Coupe de l'installation d'essai à travers une cellule permettant de réaliser les essais de gel/dégel sur enrobés

Mesures des températures

Des tests préliminaires ont été réalisés dans le but de connaître les températures obtenues à cœur de l'échantillon lorsque les cycles de gel/dégel sont appliqués depuis la surface. L'objectif était de définir une intensité de froid et une durée de cycle suffisante pour éviter les phénomènes de surfusion à cœur. La figure ci-dessous met en évidence les variations de température à différents niveaux de l'éprouvette durant l'application pendant 24 heures d'un cycle +10/-10°C en surface. Les températures extrémales obtenues vont de +6,5 à -4,5°C à mi-hauteur de l'éprouvette, de +5 à -3°C à la base et de 0°C à 1,8°C dans l'air, à 20 mm sous la base de l'éprouvette. Les variations de température de ce dernier capteur, sont très faibles à cause de l'influence de la température du bain, fixée à 2°C ± 0,5°C durant la durée de l'essai. La configuration de l'appareillage engendre donc dans le sens vertical des gradients thermiques non homogènes, variables dans le temps.

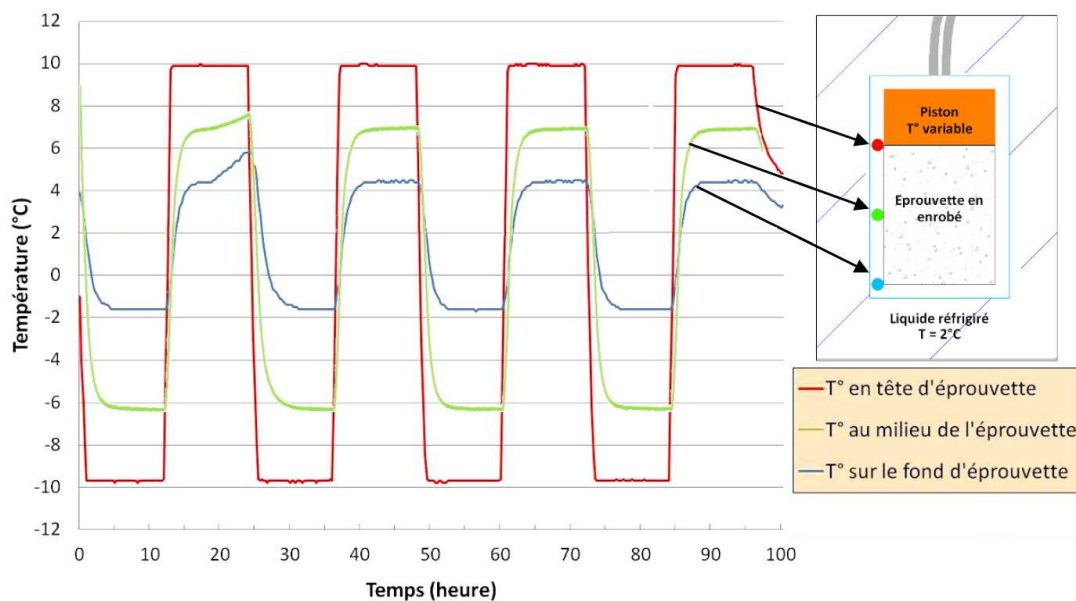


Figure 4 : Acquisition des températures à différents niveaux de l'éprouvette pendant l'essai

Dans les directions horizontales, les mesures mettent toutefois en évidence un faible écart de températures dans toute section de l'échantillon entre la température mesurée à cœur et celle mesurée en bord de l'éprouvette, ce qui valide le protocole d'essai. Dans l'étude qui suit, la température indiquée en périphérie de l'éprouvette est retenue comme température de référence.

Mesures de déformation

Des jauges de déformation (30 mm de longueur) sont mises en place en périphérie d'éprouvette, certaines dans le sens vertical parallèlement à la direction de propagation du gel, les autres suivant différents plans horizontaux. Ces jauges de déformation étant sensibles aux variations de température, les mesures sont corrigées par différence avec la réponse d'une jauge identique, soumise aux mêmes conditions thermiques et collée sur un barreau de silicate quasi insensible à la température. Des mesures de contraction/extension réalisées sur un échantillon d'inox de coefficient thermique connu ont montré une très bonne concordance entre les valeurs théoriques et les valeurs ainsi mesurées.

Dans la suite de cet article ne sont présentées que les déformations radiales, placées perpendiculairement à la propagation du gel, qui permettent de la sorte de mieux isoler les événements se produisant au passage du front de gel, contrairement aux jauges axiales qui moyennent les phénomènes sur leur hauteur. L'examen des deux types de signaux, dans les directions radiale et axiale, permet toutefois d'évaluer le comportement tridimensionnel du matériau. En l'occurrence les fortes similitudes de forme et d'amplitude constatées entre les deux mesures, à tout instant et dans tous les essais à déformations libres pratiqués ici, permet d'attester d'une réponse quasi-isotrope du matériau en toutes circonstances.

Échantillons

Les résultats présentés ci-après sont relatifs à un enrobé de type BBSG (béton bitumineux semi grenu) obtenu à partir d'une formulation granulométrique continue 0/10 mm et un bitume pur de classe 35/50. Sa porosité est de l'ordre de 10%. Une partie des échantillons produits est testée telle quelle, à sec. Les autres échantillons sont préalablement partiellement saturés par tirage au vide et immersion dans l'eau. Le degré de saturation atteint croît avec le niveau de dépression appliqué. On présente ici les résultats obtenus pour une saturation de 72%.

3.2 RESULTATS D'ESSAI SUR ENROBE SEC

La courbe de la figure 5 montre le comportement « type » d'une éprouvette d'enrobé sec. Au cours d'un cycle, on observe que la déformation de l'enrobé (courbe rouge) varie quasiment proportionnellement à la température mesurée à la même cote (courbe bleue), ce qui signifie que l'enrobé répond au premier ordre à la loi usuelle de déformation thermique.

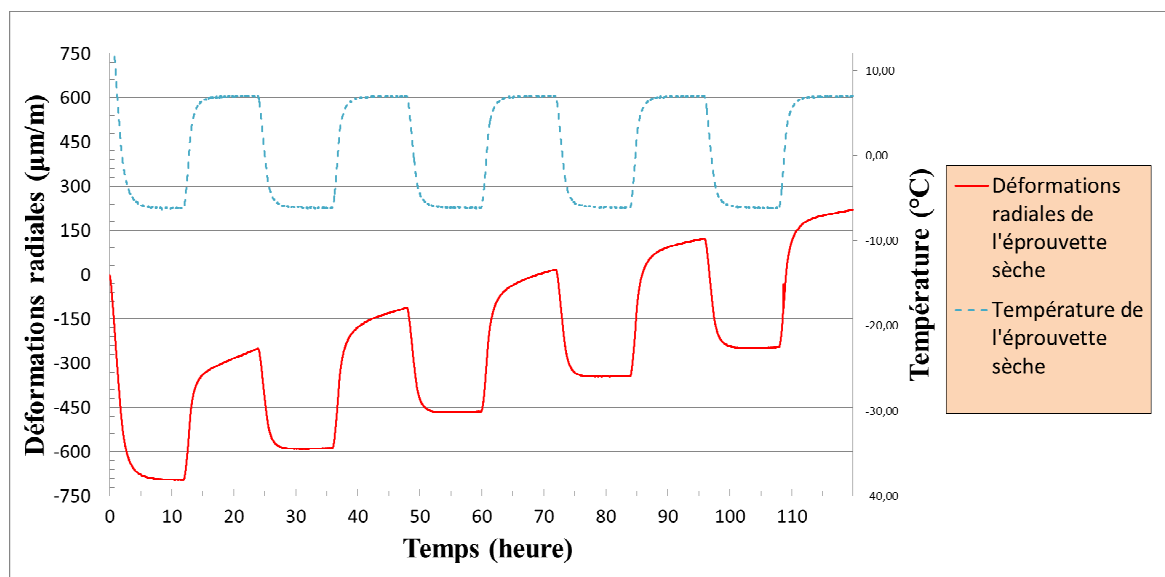


Figure 5 : Déformations radiales au cours des cycles de gel/dégel d'une éprouvette d'enrobé sec
(convention de signe : extensions dirigées vers le haut du graphe)

On remarque aussi que sous les conditions d'essai à déformation libre appliquées ici (aux efforts près du poids du piston et du poids propre de l'éprouvette), il persiste pendant les plateaux à température positive une composante de fluage en extension, qui par effet de cumul conduit au gonflement progressif de l'éprouvette. Nous n'entrerons pas ici dans les explications de ce phénomène jugé secondaire pour notre propos.

On peut calculer entre les plateaux de température d'un même cycle le coefficient thermique radial moyen $\alpha = \Delta \varepsilon_r / \Delta T$. On obtient une valeur de l'ordre de $30 \cdot 10^{-6} / ^\circ\text{C}$, conforme à ce que l'on peut trouver dans la littérature.

3.3 RESULTATS D'ESSAI SUR ENROBE SATURE A 72%

La courbe de la figure 6 montre le comportement d'une éprouvette saturée à 72% en eau. On observe une réponse nettement plus complexe que dans le cas précédent, marquée notamment par des pics de déformation (vers le haut ou vers le bas) à chaque passage à zéro de la température mesurée au niveau de la jauge radiale.

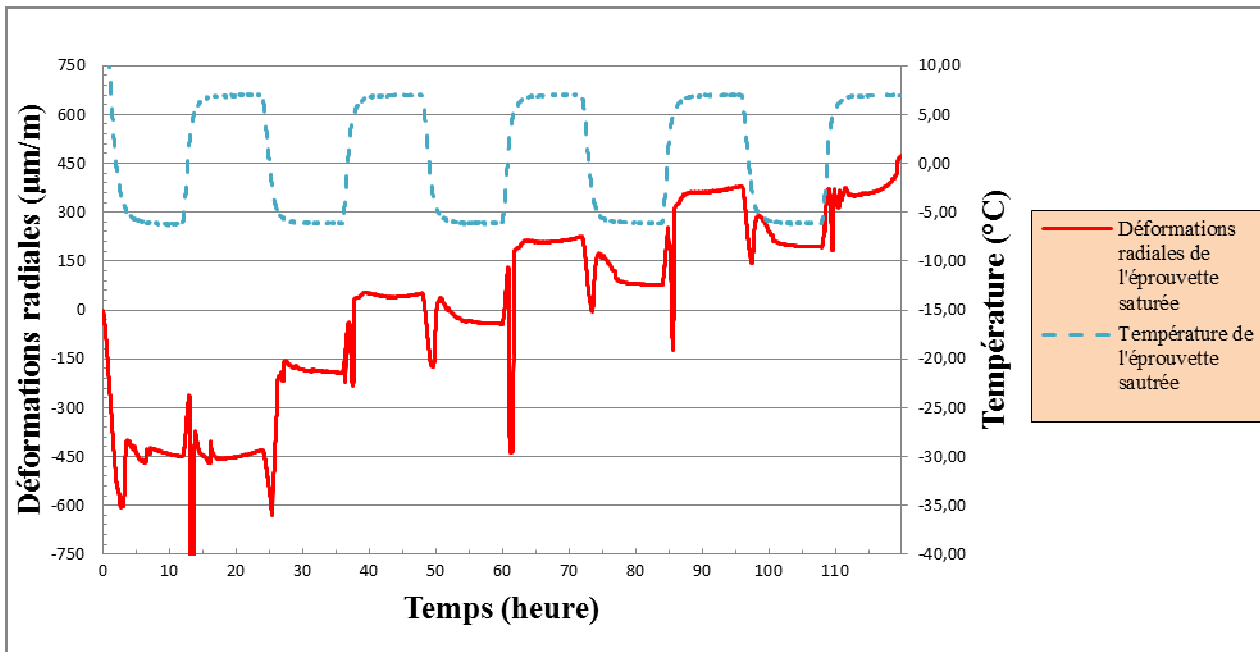


Figure 6 : Déformations radiales de l'éprouvette E8 au cours de plusieurs cycles de gel/dégel

La courbe de la figure 7 dilatée sur une durée de 17h permet de mieux visualiser et interpréter l'historique à l'échelle d'un cycle de gel/dégel, de la déformation locale du matériau, au voisinage de la section instrumentée.

Entre 0 et 1h30, en se reportant aux axes de ce graphique, la température est positive, décroissante ; le matériau commence par subir une contraction thermique comme le matériau sec.

Entre 1h30 et 3h, la température devient négative, le front de gel passe de part et d'autre de la section instrumentée dans le sens descendant. Le matériau subit une extension relative de l'ordre de 200 microdéformations. De toute évidence le phénomène est à attribuer à la dilatation du volume d'eau contenue dans les pores de l'enrobé, lors du changement d'état liquide→solide (pour rappel, la dilatation volumique eau liquide/glace est de 9%).

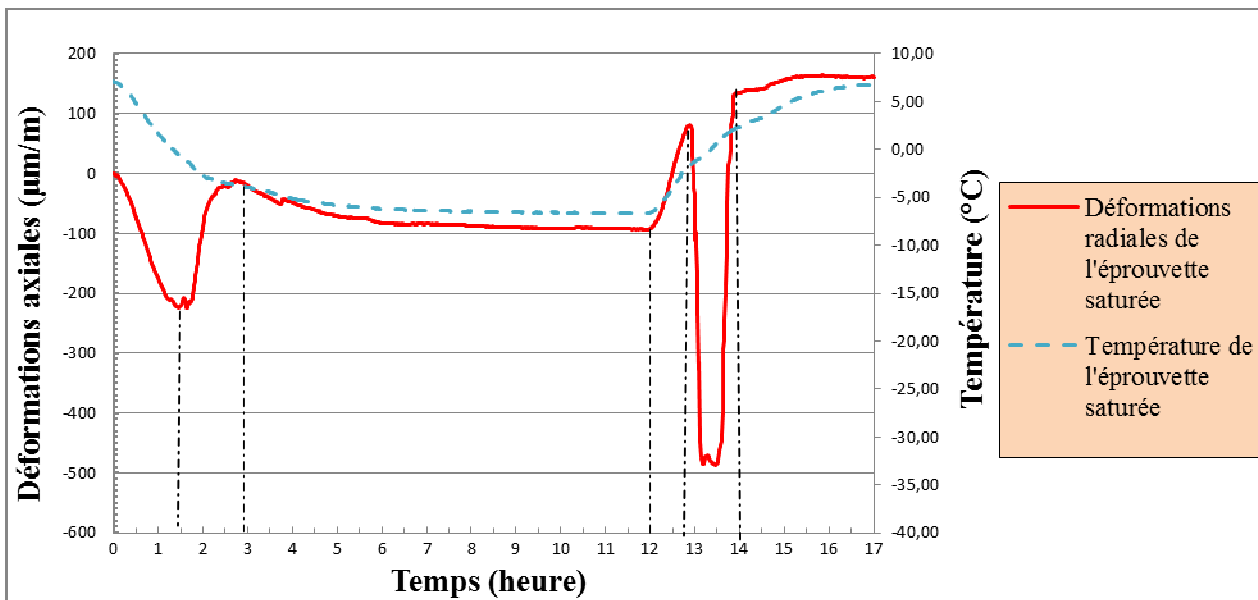


Figure 7 : Déformations radiales de l'éprouvette au cours d'un cycle de gel/dégel
Mise en évidence des différentes phases de comportement du matériau

Entre 3 et 12h, le matériau se contracte à nouveau au fur et à mesure de la baisse de température. L'eau contenue à l'intérieur des pores est en grande partie ou totalement gelée ; les granulats, le liant et la glace se contractent suivant le schéma thermo-mécanique usuel.

A partir de la douzième heure, le front de dégel remonte vers la surface de l'éprouvette. Le matériau et la glace commencent par se réchauffer dans le domaine des températures négatives ; comme attendu le matériau subit une expansion.

L'intervalle 13-14h correspond au passage du front de gel au voisinage de la jauge. Le matériau subit alors une phase de contraction importante (600 µdef) suivie d'une phase d'extension d'intensité toute aussi importante. Ces fluctuations sont liées sans nul doute à la transformation inverse solide→liquide de l'eau contenue dans la porosité du matériau et à la réduction de volume associée. L'alternance contraction/extension pourrait résulter d'un effet de dépression dans un premier temps de l'eau nouvellement fondue, par rapport à la pression atmosphérique ambiante, puis d'un rééquilibrage des pressions air/eau liquide dans un second temps.

Quant à la dernière partie de la courbe (14-17h), elle reflète à nouveau la dilatation thermique attendue d'un matériau qui se réchauffe.

Ces premiers essais mettent donc en évidence un effet tout à fait significatif d'une saturation en eau, même partielle, des enrobés bitumineux sur leur réponse en déformation libre dans le cas d'épisodes de gel/dégel.

4 QUELS IMPACTS POUR LA CHAUSSEE ?

Quels peuvent être les impacts des phénomènes vus ci-dessus sur les chaussées ?

Les essais réalisés ici ne permettent pas encore de répondre complètement à cette question et de confirmer définitivement l'origine des désordres vus sur chaussée.

Il manque pour se prononcer plusieurs volets à ces premières recherches. L'un d'entre eux est de connaître le comportement « dual » en « contrainte » des enrobés bitumineux soumis aux conditions environnementales et de saturation en eau envisagées ci-dessus.

La question se pose notamment de savoir si la présence de glace dans les pores est susceptible d'entraver les capacités de relaxation du matériau et de générer en condition de déformation gênée des niveaux de contrainte importants, susceptibles de fissurer les matériaux ou d'endommager les interfaces.

Une autre question est de déterminer précisément les distributions de contrainte et de déformation susceptibles d'être générés par ces effets au sein de structures multicouches hétérogènes, telles que les chaussées avec des matériaux de porosité et saturation en eau différentes. Ne risque-t-il pas par exemple de se développer des « effets bilames » particulièrement endommageables pour les interfaces, entre une couche sèche et une couche humide, la première se contractant par effet de refroidissement, la seconde se dilatant par effet de gel ?

Un travail de thèse à démarrer sous peu devrait permettre d'explorer ces différentes questions tant sur le plan expérimental que celui de la modélisation.

Il est attendu d'une meilleure compréhension des phénomènes en jeu que celle-ci permette de :

- Repérer et recenser les sections existantes à risque (ex : détection (par radar ?) des chaussées susceptibles d'emmagasiner de l'eau).
- Déterminer vis-à-vis de celles-ci les solutions préventives les plus appropriées (reprofilage de surface ou interne, changement(s) de matériau(x), amélioration du drainage interne et externe des chaussées,...).
- Infléchir au besoin les règles de conception et d'entretien des chaussées, en précisant par exemple les recommandations techniques du choix entre superposition de nouvelle(s) couche(s) ou substitution d'anciennes couches.

Conclusion

Depuis plusieurs années a été observée en période hivernale l'apparition de désordres importants en surface de chaussée, se manifestant sous forme de départ de matériau touchant de grands linéaires et survenant de façon subite en quelques heures.

L'analyse des cas de terrain a permis de dégager des facteurs communs aux problèmes rencontrés (épisode de gel/dégel d'assez grande amplitude, présence d'eau dans les enrobés) ainsi que des facteurs aggravants (fraisage imparfait des interfaces, défaillance des systèmes d'assainissement, empilement de couches minces et/ou le recouvrement d'anciennes couches de roulement ou de liaison).

Sur la base de ces observations, le réseau scientifique et technique de l'Etat, dont l'IFSTTAR, a défini un programme de recherche visant à répondre aux questions des exploitants routiers sur les causes des problèmes, la détection des sections à risque, les solutions curatives/préventives à y apporter.

Les premières expérimentations, rapportées ici, ont consisté à étudier et comparer les déformations libres d'éprouvettes d'enrobés secs et partiellement saturés en eau sous l'effet de la propagation de cycles de gel/dégel.

Les résultats mettent en évidence des effets tout à fait significatifs (plusieurs centaines de microdéformations) et localisés de dilatation/contraction au niveau du front de gel, liés aux changements de volume « eau liquide ↔ glace ».

Il est probable que les phénomènes observés soient à l'origine des dégradations considérées ici. Le travail de thèse prévu dans le cadre de ces recherches devra toutefois le confirmer et préciser les mécanismes en jeu, afin de pouvoir à terme en tirer des dispositions opérationnelles.

REFERENCES

1. Mauduit V., Mauduit C., Vulcano-Greullet N., Coulon N (2007). Dégradations précoces de couches de roulement à la sortie des hivers. Revue Générale des Routes et Aéroports N° 858, pp 67-72.
2. Mauduit V., Mauduit C., Vulcano-Greullet N., Coulon N., Hammoum F., Hamon David, Kerzhreho JP., Piau JM., Chabot A. (2013). Dégradation subite des enrobés bitumineux en période de gel/dégel : analyse de cas de terrain et recherche exploratoire en laboratoire. Bulletin des laboratoires des ponts et chaussées n°279, p 47 à 63.
3. Mauduit C. Hammoum F., Piau JM., Mauduit V., Ludwig S., Hamon D. (2010). Quantifying expansion effects induced by Freeze–Thaw cycles in partially water saturated bituminous mix: Laboratory Experiments. Congrès EATA et publication dans la revue Road Material and Pavement Design - Special Issue, juin 2010.