



HAL
open science

Dégradation subite des enrobés bitumineux par période de gel/dégel: Analyse de cas de terrain et recherche exploratoire en laboratoire

Valéry Mauduit, Caroline Mauduit, Nelly Vulcano Greullet, Nathalie . Coulon, Ferhat Hammoum, David Hamon, Jean Pierre Kerzreho, Jean-Michel Piau, Armelle Chabot

► To cite this version:

Valéry Mauduit, Caroline Mauduit, Nelly Vulcano Greullet, Nathalie . Coulon, Ferhat Hammoum, et al.. Dégradation subite des enrobés bitumineux par période de gel/dégel: Analyse de cas de terrain et recherche exploratoire en laboratoire. BLPC - Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées, 2013, 279, pp 47-63. hal-00850949

HAL Id: hal-00850949

<https://hal.science/hal-00850949>

Submitted on 9 Aug 2013

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Dégradation subite des enrobés bitumineux par période de gel/dégel : analyse de cas de terrain et recherche exploratoire en laboratoire

Valéry MAUDUIT

*Direction Interdépartementale des Routes du Massif
Central, Issoire, France*

Caroline MAUDUIT

CETE de Lyon, LRPC de Clermont-Ferrand, France

Nelly VULCANO-GREULLET

DREAL Bourgogne, Dijon, France

Nathalie COULON

CETE de Lyon, LRPC Autun, France.

Ferhat HAMMOUM, Hamon DAVID,

Jean Pierre KERZREHO, Jean Michel PIAU,

Armelle CHABOT

UNALM - IFSTTAR, Bouguenais, France

■ Résumé

Suite aux dégâts rencontrés sur le réseau routier français ces derniers hivers, les gestionnaires de réseau et la communauté scientifique ont cherché à comprendre les phénomènes mis en jeu afin de prévenir de telles dégradations. Les travaux menés entre 2006 et 2009 par le groupe de travail « eau-gel » de l'opération de recherche Fondephy¹ du LCPC ont permis d'investiguer en détail quelques cas de terrain et d'apporter des pistes de réponse, quant aux mécanismes d'endommagement à long et court terme susceptibles de s'être mis en place. Parmi ceux-ci est évoqué un phénomène de glissement, récemment observé sur le manège routier de Nantes, entre couche de roulement et couche de base, qui modifie la perception du fonctionnement généralement admis, de la superposition de couches bitumeuses et qui pourrait justifier d'une fatigue en partie haute de chaussée, notamment à température élevée. Dans un autre ordre d'idée, on rend compte du phénomène de gonflement au gel d'enrobés bitumineux partiellement saturés en eau, récemment observé également, au cours d'expérimentations en laboratoire, inspirées des essais de gel/dégel sur sols. Ce mécanisme pourrait être à l'origine de l'apparition subite de nids de poule en surface de chaussée, en conditions hivernales.

Degradation experienced by asphalt road mixes during periods of freeze-thaw events:

Analysis of field cases and exploratory laboratory research

■ Abstract

In light of the damage witnessed on France's road network over these past several winters, network managers and the scientific community have been seeking to understand the phenomena at play in order to prevent against such degradation. The research undertaken between 2006 and 2009 by the "water-freezing" working group as part of LCPC's Fondephy research project has allowed for an in-depth investigation of a few field cases and the generation of leads for future studies regarding the damage mechanisms capable of taking place over both the long and short term. Among these mechanisms, the phenomenon of sliding, recently observed on the Nantes pavement fatigue carousel, has been noted between wearing course and foundation layer; this finding has altered the generally held perception of pavement operations specific to the overlaying of bituminous layers and may justify a fatigue occurring over the upper part of the pavement, exacerbated at higher temperature. From another perspective, the phenomenon of swelling of frozen asphalt mixes exposed to partial water saturation could also be explored thanks to recent observations during laboratory experiments that had been inspired from soil freezing/thawing test campaigns. This mechanism may give rise to the sudden appearance of potholes at the pavement surface when exposed to winter weather conditions.

¹ <http://or.lcpc.fr/fondephy>

1. CONTEXTE

Le réseau routier structurant français a été renforcé dans les années 1970 et 1980. Il est aujourd'hui majoritairement constitué de structures bitumineuses épaisses, semi-rigides ou mixtes (Sétra-LCPC, 1997). Depuis sa construction, les couches de roulement ont été renouvelées plusieurs fois, par remplacement ou par recouvrement. Depuis quelques années, des désordres apparaissent à la sortie des hivers sur les couches de roulement de certaines voies à fort trafic. Ces dégradations prennent la forme de nids de poule, de « départs en plaque » ou « pelade » de la couche de roulement. Ces dégradations ont la particularité d'apparaître très rapidement et sans signe précurseur spécifique (Mauduit et al., 2007). Leurs conséquences sont désastreuses pour l'utilisateur, lorsque l'importance des dégradations conduit les gestionnaires à fermer les voies de circulation affectées.

Les gestionnaires de réseaux ont demandé à la communauté scientifique d'analyser le phénomène, de le comprendre, d'affiner les outils de modélisation du comportement des chaussées, de prévoir les risques d'apparition de ce type de dégradations sur le réseau existant, et bien sûr de proposer des dispositions pour les éviter.

Cet article présente les travaux engagés entre 2006 et 2009 par le groupe de travail « eau-gel » de l'opération de recherche Fondephy du LCPC « FONDEments PHYSiques du comportement mécanique des matériaux dans les structures de chaussées », afin de tenter d'élucider les facteurs et les causes des désordres observés. Deux actions ont été menées en parallèle. La première, relatée dans la section 2 de cet article, a consisté à recueillir et analyser plusieurs cas de terrain suffisamment documentés et typiques de ce genre de dégradation (Vulcano et al., 2010). Un rapprochement a également été effectué avec des observations relativement récentes et nouvelles, faites lors d'expérimentations sur le manège de fatigue routier de l'IFSTTAR et relatives au fonctionnement à température élevée des interfaces entre couches de chaussée. L'autre action a concerné l'étude en laboratoire du comportement au gel / dégel des enrobés bitumineux, partiellement saturés en eau, par transposition à ces matériaux des essais habituellement réalisés sur les sols (Mauduit et al., 2010).

2. LES RETOURS D'EXPÉRIENCE DU TERRAIN

De nombreuses dégradations sont apparues sur les réseaux routiers français ou étrangers, depuis environ une décennie. Quelques cas ont été documentés précisément aux États-Unis (Kandhal et al., 2001), au Canada et en Australie (Fromm et al., 1969 ; Kandhal et al., 1989 ; Hicks, 1991 ; Kandhal et Rickards, 2001), notamment. Les travaux menés au sein de l'opération de recherche Fondephy se sont rapportés plus spécifiquement aux quelques cas rencontrés récemment en France, caractérisés par l'apparition subite et massive de nids de poule en période hivernale (Vulcano-Greulet et al., 2010). Ces cas ont conduit à recueillir, en reprenant contact au besoin avec les entreprises ou en parcourant les dossiers de contrôle extérieur des chantiers, un spectre assez large d'informations sur la structure de chaussée, les séquences d'entretien, le trafic, la date de construction, la période d'apparition des phénomènes, la localisation sur le territoire français, les sollicitations climatiques, etc.

Deux cas sont ici relatés à titre d'exemple.

■ Chaussée située au nord-est de la France (désordres subits observés en 2005)

Il s'agit d'une chaussée supportant un trafic de 2700 poids lourds par jour. Le tracé, en rampe à 5 %, se situe dans des zones vallonnées au climat continental caractérisé par des étés relativement chauds et des hivers froids et humides. Sur cette section, la structure de chaussée est de type semi-rigide (Sétra-LCPC, 1997). Les couches d'assise sont constituées de 50 cm d'une grave-laitier 0/20 silico-calcaire, mise en œuvre dans les années 1970. Depuis la date de construction, trois campagnes d'entretien ont été menées en rechargement, ce qui conduit en 2001 à une structure de chaussée comportant jusqu'à 35 cm de matériaux hydrocarbonés.

Le relevé visuel de dégradation effectué en 2001 montre, sur la section de deux kilomètres, des dégradations de type faïençage dans les bandes de roulement de la voie lente. Suite à des arrachements lors de fortes précipitations estivales, une opération d'entretien d'un kilomètre a été réalisée sur la partie aval. L'entretien a consisté à renouveler la couche de surface après rabotage de la couche de roulement et d'une partie seulement de la couche de liaison. Les matériaux utilisés dans les enrobés sont des matériaux locaux de type alluvion silico-calcaire, basalte andésitique ou encore micro-diorite. Pour ces derniers, les caractéristiques d'adhésivité vis-à-vis du liant peuvent parfois être défaillantes et nécessitent souvent l'apport de dope d'interface. Le liant utilisé en couche de surface (liaison et roulement) est un liant spécifique type multigrade 35/50, particulièrement adapté pour les zones où les risques d'orniérage sont importants (rampe, voie lente, etc.).

Le relevé visuel de dégradation effectué en 2005 montre, sur le premier kilomètre de la section qui n'a pas fait l'objet de reprise en 2001, des fissures franches transversales sur 10 % de la surface et des fissures franches longitudinales en bande de roulement sur 30 % de la surface. Aucune trace d'autre dégradation ou d'arrachement n'est signalée.

Lors de l'hiver 2005/2006, en quelques jours, de nombreux nids de poules sont apparus sur le premier kilomètre de la section (**figure 1**), nécessitant des réparations d'urgence, parfois plusieurs fois par jour. Ces nids de poule de dimension de plusieurs décimètres carrés et de 5 à 12 cm de profondeur sont nombreux, peu espacés les uns des autres et se localisent en voie lente, préférentiellement dans les bandes de roulement. Les carottages effectués sur cette portion de chaussée, après ces événements, montrent que l'assise traitée au liant hydraulique est en très bon état, avec une fine couche d'enrobé collée à celle-ci. La couche de roulement fissurée et faïencée repose sur deux couches sans cohésion, avec des matériaux hydrocarbonés qui présentent un désenrobage très important.

figure 1
Désordres
dans la chaussée
du nord-est de la France
a : Carotte de la
structure de chaussée
b : Chapelets de nids
de poule
pluridécimétriques



a b



■ Chaussée située au centre de la France (désordres en 2010)

Il s'agit ici d'une bretelle autoroutière, dont le tracé d'un kilomètre est en légère courbe avec un dévers unique à 1 % du sens 1 vers le sens 2. En 2009, le trafic de poids lourds se limitait à 860 véhicules/jour pour un trafic moyen de 20 000 véhicules/jour. Cette chaussée péri-urbaine traverse une zone de plaine au climat subcontinental sec, dont les variations thermiques et hydriques sont importantes. Il s'agit d'une structure inverse composée, à sa construction en 1996, de bas en haut, de 25 cm de sable-ciment (SC), 12 cm de graves reconstituées humidifiées (GRH), 8 cm de grave-bitume (GB), 6 cm de béton bitumineux semi-grenu (BBSG) et 4 cm de béton bitumineux drainant (BBDR). Aujourd'hui, après le rechargement en 2000 du BBDR par un béton bitumineux mince discontinu (BBMa), la GRH est surmontée, dans les deux sens de circulation, de 22 cm de matériaux traités aux liants hydrocarbonés. Les couches d'accrochage sont présentes et bien dosées. Les matériaux de chaussées sont de type basalte et rhyolite, sans ajout de dope d'adhésivité. Le liant hydrocarboné du BBSG et du BBDR est un bitume multigrade, celui du béton bitumineux mince (BBM) le recouvrant est un bitume pur de grade 50/70. En 2008, une visite de terrain a relevé des fissures longitudinales en bande de roulement dans le sens 2, qui n'étaient pas mises en avant par

la note image qualité du réseau routier national (IQRN) compte tenu de la méthode de relevé, qui concerne uniquement le sens 1 sur chaussée bidirectionnelle.

Fin janvier 2010, des nids de poule se forment dans un laps de temps très court, nécessitant une fermeture de la section. Les dimensions de ces nids de poule dépassent un décimètre carré et leur profondeur atteint parfois 15 cm. Ces défauts sont constatés sur la bande de roulement du sens 2, sur un linéaire de plus de 500 m correspondant majoritairement au point bas du profil. Il est également constaté que la structure de chaussée est en charge, bien qu'elle soit en remblai, car les nids de poule se remplissent en quelques minutes quand ils sont vidés (figure 2a). Les carottages effectués sur le site montrent la désagrégation du béton bitumineux au niveau de la première interface (figure 4b), à une profondeur de quelques centimètres dans ce cas.

figure 2

Observations faites sur la section 2 (centre de la France)
a : Remontée dans un nid de poule d'eau en charge dans le BBDR
b : Carotte avec BBDR désagrégé



La figure 3 retrace les conditions hivernales rencontrées sur le site au cours du mois de janvier 2010. On note la présence de nombreux cycles quotidiens de gel/dégel ($T_{\min} < 0$, $T_{\max} > 0$ sur la même journée) avec de fortes amplitudes de température journalière (-4 à +7°C en 8h) et des précipitations sous forme liquide.

a b

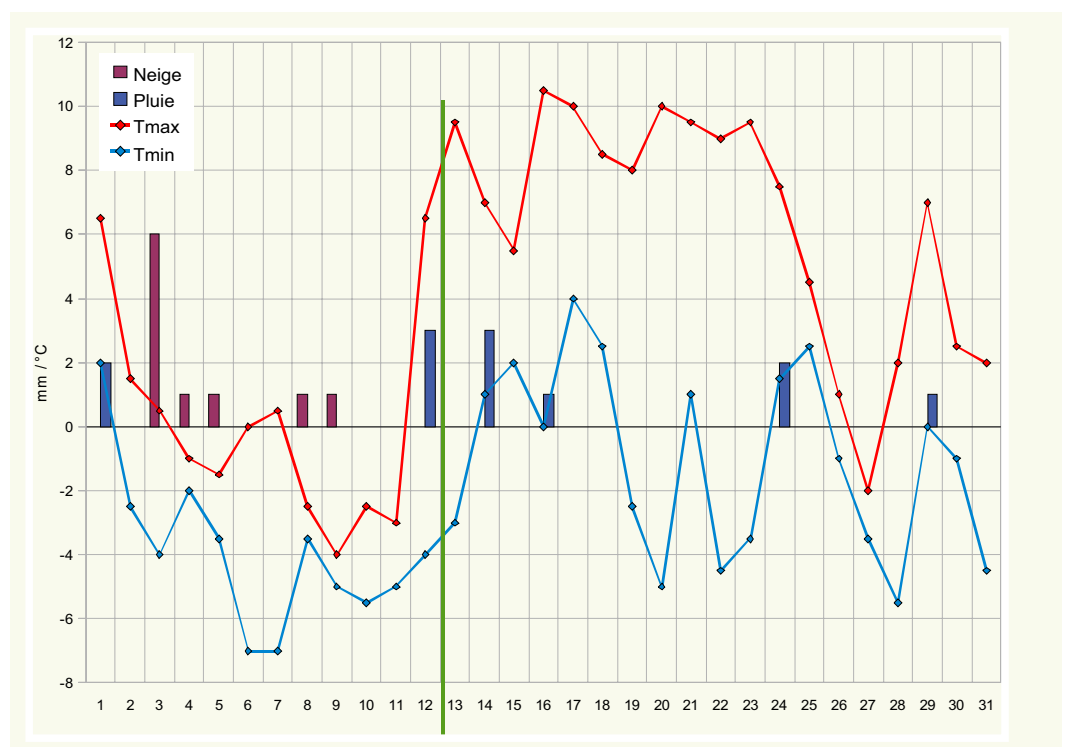


figure 3

Relevé météorologique de janvier 2010 issu de la station de Météo France située à moins de 3 km de la zone de dégradation

■ Analyse des causes probables des dégradations

Les circonstances d'apparition des désordres décrits ci-avant permettent d'affirmer sans nul doute l'existence d'un mécanisme spécifique, conduisant à la formation généralisée de nids de poules sur un laps de temps très réduit. Se posent alors les questions suivantes : quels sont ce mécanisme et les facteurs associés ? Suffit-il en lui-même à expliquer l'ensemble des phénomènes ou joue-t-il plus « modestement » un rôle de déclencheur sur des chaussées, dont l'état aurait préalablement été dégradé par des mécanismes d'endommagement de plus long terme ?

Face à ces questions, trois facteurs ont été plus spécifiquement discutés : le trafic, la présence d'eau dans la chaussée et les variations de température.

› Le rôle du trafic

Le trafic, exprimé en millions de poids lourds attendus sur la durée de vie de la chaussée, est généralement considéré comme le facteur prépondérant de la dégradation par fatigue à long terme des chaussées. Dans le cadre de la méthode française de dimensionnement des chaussées, c'est lui qui détermine en grande partie le dimensionnement des couches structurales.

Dans les cas étudiés, ce facteur joue sans doute un rôle lors de la phase d'évolution rapide, comme en atteste la localisation des nids de poule, situés essentiellement en bandes de roulement. Mais il ne peut s'agir à cette échelle de temps que d'un rôle secondaire et non pas d'un effet de fatigue au sens usuel du terme, dans la mesure où le nombre de poids lourds à passer pendant les quelques heures paroxystiques du phénomène est tout au plus de l'ordre du millier.

Il est possible en revanche que le trafic ait pu contribuer à une fatigue à long terme en partie haute de chaussée et ait pu rendre celle-ci plus particulièrement vulnérable au gel/dégel. Mais un éventuel mécanisme de la sorte est à rechercher hors du schéma de fonctionnement habituellement admis pour les chaussées bitumineuses, qui suppose un comportement en compression et donc sans fatigue des couches situées en haut de chaussée et qui ne tient pas compte non plus des cisaillements répétés aux interfaces. On verra précisément plus loin (section 2.4) que ces hypothèses peuvent être sujettes à caution.

› Le rôle de l'eau

Les cas étudiés permettent de conclure à la présence systématique d'eau dans les sections de chaussée dégradées et ceci préalablement à l'apparition des désordres. On peut donc penser que l'eau, à l'état liquide ou à l'état de glace, a joué un rôle moteur important à long et/ou court termes pour la pathologie considérée ici. Rappelons que l'accumulation d'eau dans une chaussée bitumineuse peut se produire de différentes façons (figure 4). La cause la plus courante est par précipitation puis infiltration à des degrés plus ou moins importants au travers du revêtement de surface de la chaussée, qu'il soit sain ou dégradé. On peut assister également à des infiltrations depuis les bords de la

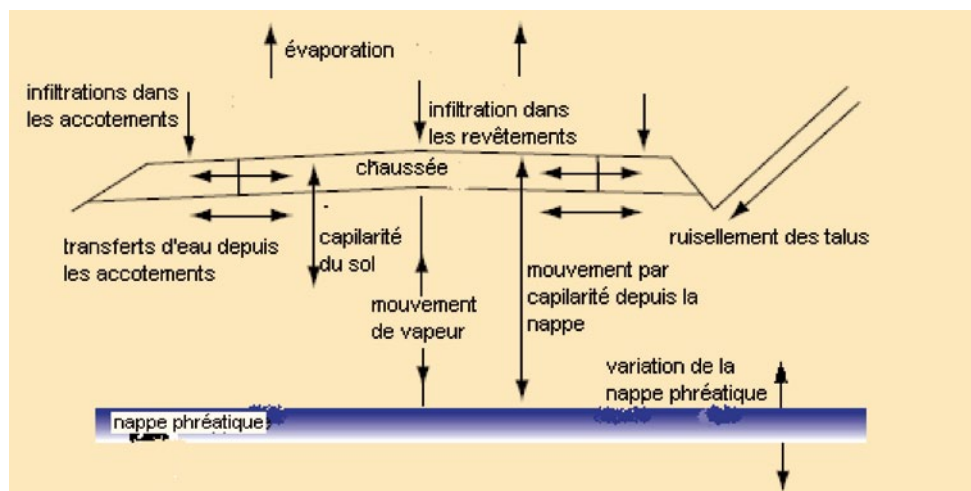
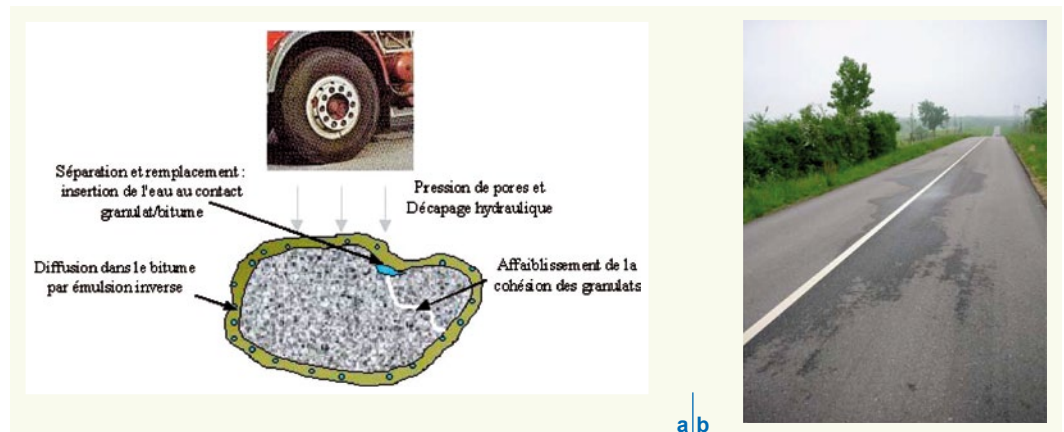


figure 4
Circulation d'eau dans
la plate-forme et la
chaussée (Castaneda
Pinzon, 2004)

structure (eaux venues des coteaux, des fossés...) ou par absorption capillaire de l'eau des nappes phréatiques ou remontée de ces dernières.

Un système d'évacuation des eaux défaillant, mal positionné ou absent, une géométrie mal étudiée ou mal respectée - notamment lors des travaux d'entretien - à l'échelle de la chaussée ou de la superposition des couches, un tracé défavorable, la présence d'une source, la multiplication des interfaces lors d'entretiens successifs, sont donc autant de facteurs qui peuvent provoquer l'arrivée et/ou la stagnation de l'eau de ruissellement dans les chaussées. Des zones entières peuvent devenir gorgées d'eau de façon temporaire ou permanente et conduire à plus ou moins long terme à un désherbage du matériau (**figure 5**). Mais on verra aussi dans la section 3 qu'à cette action

figure 5
Effets de l'eau
(figure extraite
de Castaneda
Pinzon, 2004),
a : Effets de l'eau sur le
couple granulat-bitume
b : Résurgence d'eau
au joint de chaussée



physico-chimique de sape peuvent s'ajouter en période hivernale des effets mécaniques subits, possiblement sources de désordres, lors du changement de phase liquide/glace de l'eau contenue dans l'espace poral des enrobés bitumineux.

■ Le rôle de la température

Dans l'hypothèse d'un mécanisme de long terme, précurseur du mécanisme subit observé en hiver, il a été jugé utile de regarder l'effet des températures élevées, qui sont aussi des sources potentielles d'endommagement dans les chaussées.

► Températures estivales

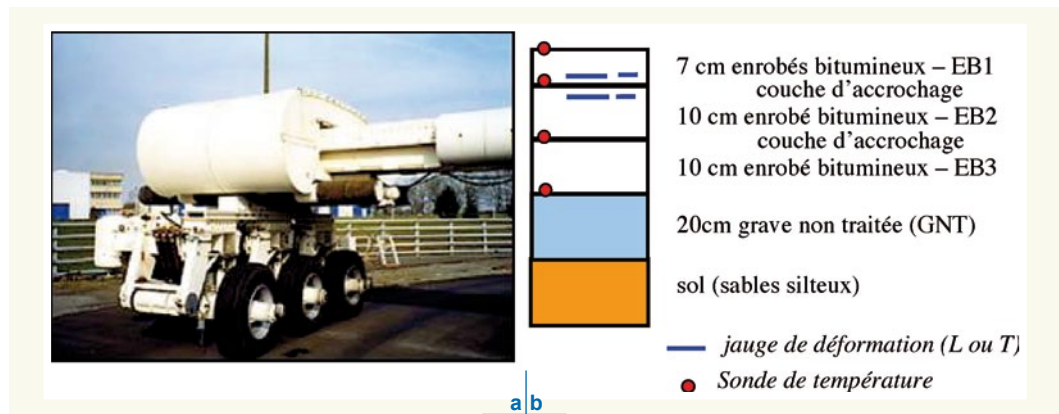
En période estivale, l'effet de l'ensoleillement et des températures est surtout connu comme pouvant engendrer le fluage et l'orniérage des couches bitumineuses en haut de chaussée sous l'effet du trafic, en fonction du squelette granulaire et des grades de bitume présents. Mais ce mécanisme n'a pas été identifié dans les cas rapportés ici et ne semble pas, de toute façon, de nature à fatiguer le haut des chaussées.

Il est également admis que l'ensoleillement et les rayons ultraviolets accélèrent le vieillissement des matériaux en surface de chaussée par oxydation du bitume, en le durcissant et en le fragilisant. En outre ceci peut conduire sur les sections ayant fait l'objet d'un entretien par rechargement, à la présence d'anciennes couches de roulement fragilisées, en-dessous des couches neuves d'apport. Qu'en est-il alors de l'évolution de ce type de « complexe » sous l'action du trafic et de sollicitations de cisaillement répétées ?

De récentes mesures effectuées sur le manège de fatigue routier de Nantes (**Figure 6**) conduisent ici à se réinterroger sur le véritable fonctionnement des couches bitumineuses situées en haut de chaussée.

Des jauges placées de part et d'autre de l'interface entre couche de roulement et couche de base bitumineuses ont permis d'enregistrer les déformations longitudinales et transversales créées par le

figure 6
Mesures effectuées sur le manège de fatigue du LCPC (IFSTTAR)
a : Train de roulement : Tridem à roues larges
b : Description de la structure de chaussée du manège instrumentée



passage de charges « tridem », le milieu de la bande des pneumatiques étant situé à l’aplomb des capteurs. Les mesures ont été effectuées pour deux profils verticaux de température dans la chaussée, fortement différenciés, l’un froid, l’autre chaud (**tableau 1**).

Les graphiques des **figures 7** et **8** montrent les réponses obtenues dans les deux cas, en bas de la couche de roulement et en haut de la couche de transition (EB2).

La comparaison de ces signaux en termes de signe et d’intensité montre clairement que l’hypothèse de continuité des déformations de part et d’autre de l’interface, habituellement admise (hypothèse

tableau 1
Deux états de température différents dans la structure

Niveau	État 1	État 2
	27-02-2009 (10 :10)	04-06-2009 (15 :30)
0 cm	10°C	43°C
-7 cm	9°C	41°C
-17 cm	9°C	34°C
-27 cm	9°C	29°C

figure 7
Signal de déformation en bas de la couche de roulement
a : Déformations à l’état 1 (froid)
b : Déformations à l’état 2 (chaud)

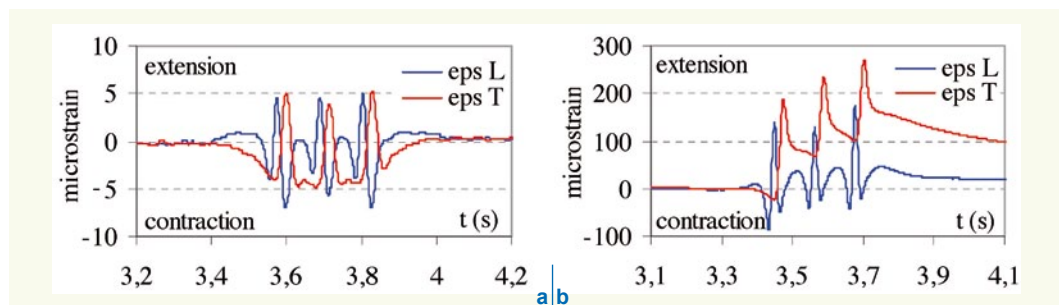
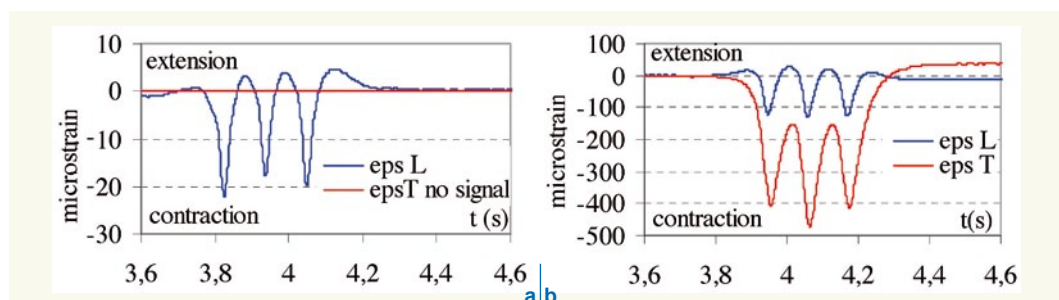


figure 8
Signal de déformation en haut de EB2.
a : Déformation à l’état 1
b : Déformation à l’état 2



d'interface collée), est mise en défaut, notamment à température élevée. Malgré la présence d'une couche d'accrochage bien réalisée et bien dosée, le tridem de 12,75 kN entraîne un glissement des couches de chaussée les unes sur les autres, avec apparition en bas de la couche de roulement d'extensions pouvant atteindre de fortes intensités, notamment dans le sens transversal. Le degré de généralité de ces observations reste encore à évaluer, ainsi que leurs conséquences éventuelles sur l'intégrité des couches et des interfaces situées en partie supérieure de chaussée. Mais il n'est pas exclu que ce mode de fonctionnement puisse entraîner une fatigue en partie haute de chaussée (fissuration verticale et longitudinale en mode I des couches, décohésion en mode II des interfaces, ...) et faire le lit des désordres observés lors des épisodes de gel/dégel.

► Températures hivernales

Il est certain que les cas de désordres considérés ici ont été déclenchés par des enchaînements spécifiques, à l'échelle de quelques jours voire quelques heures, de conditions hivernales, non complètement identifiés dans leur particularité à cet instant, mais inscrites, comme le montrent les relevés météorologiques, au sein d'épisodes de gel/dégel avec des variations rapides de température. Il est fort probable également que ces conditions aient eu un impact particulier en raison de la présence d'eau dans les enrobés bitumineux et qu'à ce titre les précipitations pluvieuses (et/ou neigeuses) tombées au cours de ces épisodes aient aussi pu jouer un rôle.

C'est pourquoi un travail exploratoire a été mené en laboratoire sur le comportement au gel/dégel d'enrobés bitumineux partiellement saturés en eau (section 3).

Mais, de même que les températures estivales ont pu avoir un effet de long terme fragilisant les structures de chaussée avant leur dégradation subite, il se peut que les hivers successifs subis par les chaussées aient aussi contribué à un endommagement progressif – trouvant éventuellement son origine dans le même mécanisme que celui provoquant les nids de poule, mais de façon moins exacerbée.

Il est intéressant de rappeler à ce propos les résultats de l'analyse statistique des températures mesurées sur le site expérimental de la RN57 dans les Vosges durant les hivers 2004-2005 et 2005-2006 (Mauduit et Mauduit, 2006). Ils mettent en évidence (**tableau 2**) pour l'hiver 2004-2005 un nombre important d'alternances de températures positive/négative au sein de la chaussée, qui décroît avec la profondeur quand on s'éloigne de la surface du revêtement, mais qui va de 51 à 80.

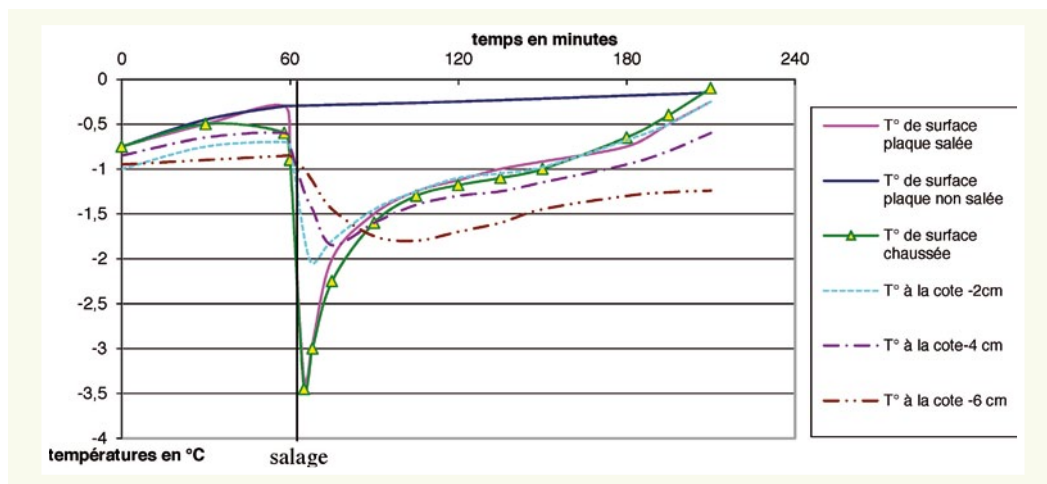
tableau 2
Nombre de cycles de gel/dégel à différents niveaux de la structure du site expérimental de la RN 57 (Mauduit et Mauduit, 2006)

Position	Nombre de passages en-dessous de 0°C puis au-dessus de 0°C
T _a	80
T _s	80
T-2,5	74
T-5,5	60
T-8,5	51

Si l'on considère que la durée de vie d'un revêtement est de 12 à 15 ans, ceci montre qu'un revêtement est susceptible de subir entre 500 et 1200 cycles de gel/dégel à sa surface.

Il est utile aussi de rappeler que les interventions liées à la viabilité hivernale sont susceptibles d'engendrer un « stress » complémentaire dans les couches de roulement. Les situations météo routières de type neige ou verglas conduisent en effet les services d'exploitation à des traitements curatifs pour traiter la pellicule de neige résiduelle (5 à 15 mm après le raclage) ou la pellicule de verglas qui s'est formée à la surface du revêtement. Ce type d'action, au contraire de celles consistant à traiter de façon préventive au moyen d'un fondant un risque de verglas dû à une congélation d'humidité préexistante, mobilise la chaleur latente de fusion de la neige ou du verglas en entraînant un « choc thermique » relativement brutal à la surface du revêtement. La **figure 9**, issue de données

figure 9
Choc thermique dû au salage d'une couche de verglas préexistant sur la chaussée (Boutonnet et Livet, 1990)



mesurées sur planches expérimentales (Boutonnet et Livet, 1990), met en évidence, suite à un salage de 40 g/m² sur une épaisseur de verglas de 2 mm, une chute de la température de surface du revêtement de 2,9°C. On note également l'impact sur les températures mesurées aux cotes -2, -4 et -6 cm.

3. CARACTÉRISATION EN LABORATOIRE DES EFFETS INDUITS DANS LES ENROBÉS BITUMINEUX PAR DES CYCLES DE GEL/DÉGEL

Les observations de terrain rapportées ci-dessus permettent de déterminer les facteurs qui ont influencé à long ou court terme les désordres subits apparus en hiver. Mais elles ne livrent pas en tant que tels les mécanismes précis à l'origine du départ subit de matériaux. Afin d'essayer de préciser celui-ci, des essais originaux sur enrobés bitumineux, inspirés des essais de gonflement au gel des sols, ont été entrepris dans Fondephy.

Le comportement au gel/dégel des sols en présence d'eau capillaire est une question étudiée depuis longtemps, notamment en construction routière et il est à peu près bien compris aujourd'hui et résolu de façon satisfaisante. Trois effets principaux sont susceptibles de se produire dans un sol : i) un gonflement en phase de gel du fait de la transformation en glace de l'eau liquide contenue initialement dans les pores, ii) l'aggravation éventuelle du phénomène par un effet de cryosuction augmentant la saturation en eau des sols en présence d'une source d'eau liquide (ex : nappe phréatique) à faible distance du front de gel, iii) l'effondrement des propriétés mécaniques et notamment de la portance en phase de dégel.

Ceci a conduit, de longue date, à développer des essais et protocoles expérimentaux en laboratoire permettant de classer les sols vis-à-vis de leur sensibilité au gel/dégel. Le RST a ainsi mis au point un essai permettant de reproduire la descente et la remontée d'un front de gel dans des éprouvettes de sol humide.

Nous avons cherché, dans l'opération Fondephy, à transposer cet essai au cas des enrobés bitumineux partiellement saturés en eau, en cherchant notamment à travers ces premiers essais à savoir si ces enrobés étaient également susceptibles de subir des déformations de gonflement à « contre-courant » des déformations attendues dans un enrobé sec qui se refroidit.

Ce chapitre reprend en grande partie l'article publié par Mauduit et al. (2010).

■ Matériaux utilisés et préparation

› Choix de la formulation

Une formulation d'enrobé 0/10 mm proche d'une formulation classiquement utilisée en couche de roulement dans le nord-est de la France a été retenue pour les expérimentations. Le matériau a été

confectionné en laboratoire à partir d'un granulat andésitique (carrière de Trapp) dont la granularité est présentée dans le **tableau 3**.

tableau 3
Granulométrie
des granulats utilisés
dans l'enrobé

Taille du tamis (mm)	0,063	0,5	1	2	4	6,3	10
Pourcentage de passants	7,5	15	20	29	42	58	93

Quarante-huit échantillons identiques ont été confectionnés à la presse Duriez : moulage par compression à double effet, en suivant la norme NF P 98-251-7. Ce mode de confection a été retenu de façon à l'adapter à la taille des cellules de l'installation de gonflement au gel des sols décrite ci-après (80 mm de diamètre par 90 mm de hauteur). Un faible niveau de compactage a été volontairement retenu pour cette étude, de façon à obtenir une porosité et une teneur en eau élevées et à exacerber de la sorte les phénomènes à observer. Les pourcentages de vide moyens mesurés au gammadensimètre sont compris entre 8,9 et 9,4 %, avec une masse volumique sèche du mélange de 2,602 kg/m³.

Des mesures de distribution de pores par traitement d'image (Hammoum et Hornych, 2004) ont été réalisées dans le but de mieux connaître la distribution de taille des pores et d'aider à la compréhension des mesures réalisées. Ce travail, non présenté ici, a permis de mettre en évidence, sur l'un des 48 échantillons, que plus de 90 % du volume des pores sont constitués de pores dont le rayon est compris entre 0,7 et 3,2 mm, avec un rayon moyen inférieur à 1,1 mm.

► Conditionnement des éprouvettes

Une procédure de conditionnement a été adoptée pour introduire de façon accélérée l'eau à l'intérieur des pores communicants, avant de réaliser l'essai de gel/dégel. Pour ce faire, les échantillons ont été saturés par dépression sous eau. Deux niveaux de dépression (47 kPa et 86 kPa) ont été fixés de façon à voir l'influence de ceux-ci sur la saturation des éprouvettes. Le poids d'eau absorbé par l'échantillon est utilisé pour calculer le degré de saturation S_r de chaque échantillon (Delorme et al., 2007). Les échantillons utilisés pour les essais de gel/dégel sont décrits dans le **tableau 4**.

tableau 4
Les trois échantillons
utilisés pour les essais
de gel/dégel.

Échantillons	Masse (g)	Hauteur (mm)	Densité apparente (kg/m ³)	Teneur en vide moyenne θ_{vide} mesurée au gamma densimètre (%)	Dépression (kPa)	Degré de saturation S_r (%)
EB-36	999,2	85,81	2,317	9,2	-	0
EB-34	1001,7	86,73	2,298	9,2	47	29
EB-33	1001,1	86,26	2,309	9,1	86	51

■ Dispositif d'essai et instrumentation

► Dispositif d'essai

L'installation d'essai permet de congeler de façon « unidimensionnelle » des échantillons cylindriques du (des) matériau(x) à tester. Elle comporte six 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). La **figure 10** présente la coupe d'une cellule dans le dispositif d'essai. 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 favoriser les succions cryogéniques et capillaires qui pourraient se développer. Les essais présentés dans cet article ont été réalisés sans nappe.

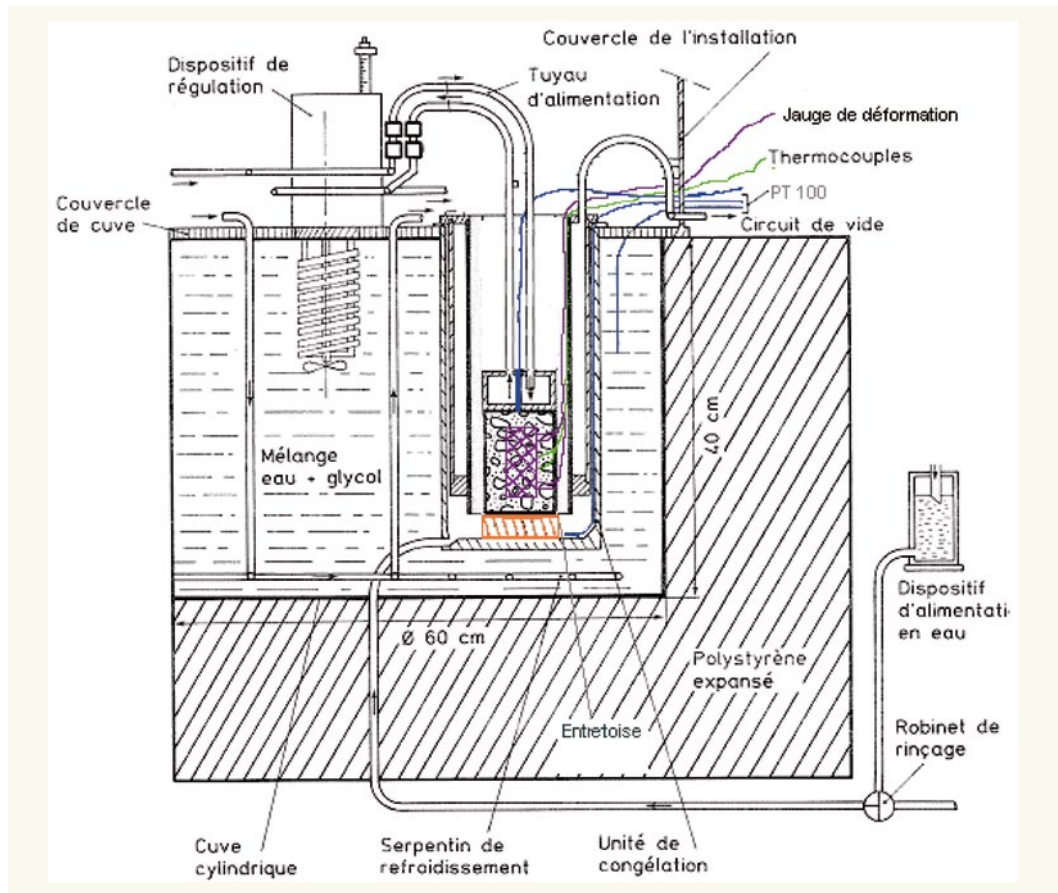


figure 10
Coupe de l'installation
d'essai permettant
de réaliser les essais
de gel/dégel sur enrobés.

› Instrumentation

• Mesures de température

Des tests préliminaires ont été réalisés dans le but de connaître les températures obtenues au cœur de l'échantillon lorsque des cycles de gel/dégel sont appliqués en surface. L'objectif était de définir une intensité de froid et une durée de cycle suffisantes pour permettre d'atteindre des températures négatives à cœur et d'éviter les phénomènes de surfusion. La **figure 11** met en

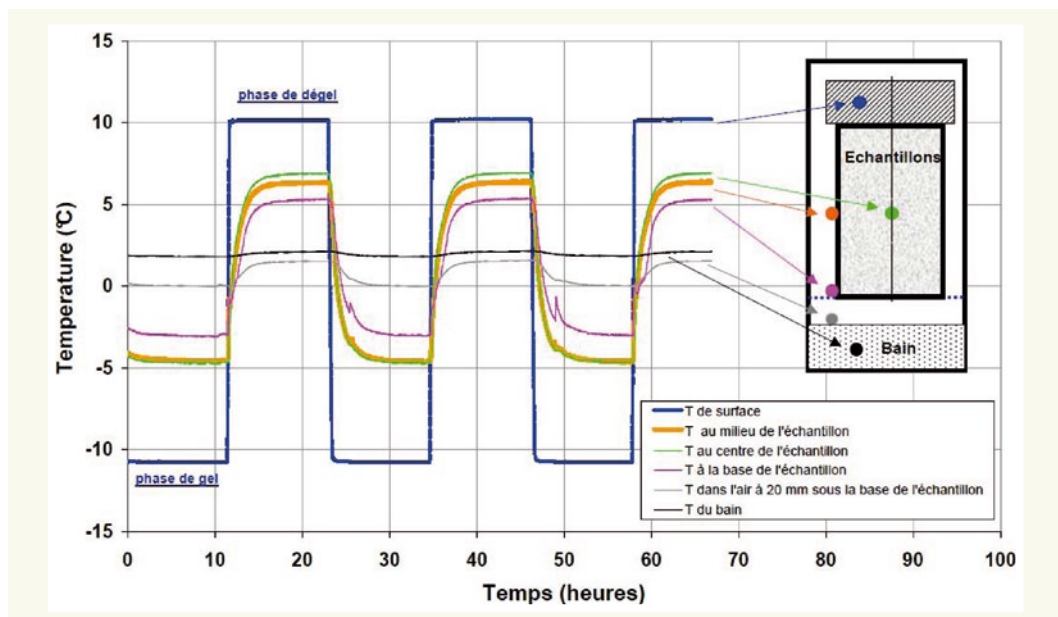


figure 11
Acquisition des
températures à différents
niveaux de l'éprouvette
pendant l'essai de gel/
dégel.

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 extrêmes obtenues sont les suivantes : +6,5/-4,5°C à mi-hauteur de l'éprouvette, +5/-3°C à la base et 0°C/1,8°C dans l'air, 20 mm sous la base de l'éprouvette. Les variations de températures 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 un gradient thermique vertical non homogène dans l'éprouvette.

Les mesures ne mettent toutefois en évidence qu'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

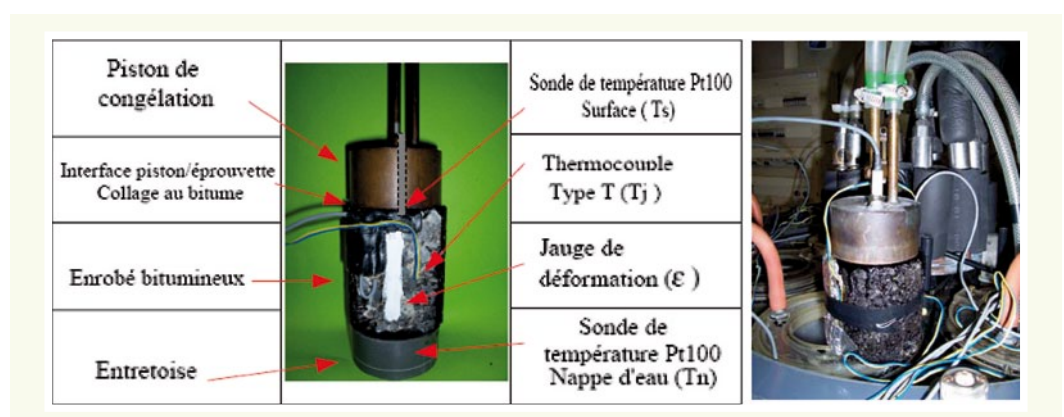
Des jauges de déformation (30 mm de longueur, 120 ohms, de marque KYOWA) ont été mises en place sur un méplat aménagé en périphérie d'éprouvette, ceci permettant à la fois d'avoir une surface plane pour coller les jauges et d'éviter les effets de bords liés au moule de compactage. La surface sciée et nettoyée de l'éprouvette est imprégnée d'un primaire d'accrochage, visant à combler les pores de l'enrobé pour améliorer le collage ultérieur. La jauge de déformation est collée verticalement sur cette surface, perpendiculairement à la direction de propagation du gel. Elle est ensuite raccordée aux câbles d'alimentation et recouverte d'une pâte spéciale et d'un ruban de protection sur feuille aluminium, visant à protéger la jauge contre l'humidité.

Ces jauges de déformation étant sensibles aux variations de température, il est nécessaire de réaliser une correction du signal que l'on acquiert. On place pour cela, dans les mêmes conditions d'essais, une jauge identique, collée sur un barreau de silicate dont la déformation est quasi nulle, compte tenu de son coefficient de dilatation thermique très faible de $0,03 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, négligeable devant celui des enrobés bitumineux routiers, de l'ordre de $30 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$.

Cette technique de compensation de température permet par différence d'obtenir pour l'éprouvette d'enrobé le signal lié à la déformation propre de la jauge.

L'instrumentation complète de l'éprouvette est indiquée sur la **figure 12**.

figure 12
Instrumentation de l'échantillon et mise en place dans la cellule de gel.



De façon à valider le protocole d'essai, des mesures de contraction/expansion ont été réalisées sur un échantillon en inox de coefficient thermique connu et les résultats ont montré une très bonne concordance entre les valeurs calculées et les valeurs mesurées.

■ Résultats des essais sur enrobés bitumineux

› Évolution de la déformation axiale : détermination du coefficient de dilatation

La déformation thermique (dilatation/contraction) pure (sans contrainte) d'un matériau est exprimée usuellement à travers le coefficient d'expansion thermique (volumique ou linéique), noté α :

$$\alpha = \frac{d\varepsilon^T(T)}{dT} \quad (1)$$

où ε^T est la déformation (volumique ou linéique) et T la température.

Sur une plage de température donnée $[T_1, T_2]$, on définit aussi le coefficient de dilatation moyen par :

$$\alpha_m = \frac{\varepsilon^T(T_2) - \varepsilon^T(T_1)}{T_2 - T_1} \quad (2)$$

Les essais sur les différents échantillons EB-33, EB-34 et EB-36 ont commencé à température ambiante (18°C), et se sont poursuivis par une chute de température à une vitesse de 20°C/heure jusqu'à ce que la température de -10°C soit atteinte en haut des éprouvettes. La température est ensuite maintenue à -10°C durant 11 heures, et réaugmente à la même vitesse de 20°C/heure jusqu'à atteindre +10°C en surface des éprouvettes.

La température à mi-hauteur de l'éprouvette, considérée comme température moyenne de l'éprouvette et de la jauge, est représentée sur la **figure 13** (courbe supérieure, échelle de droite).

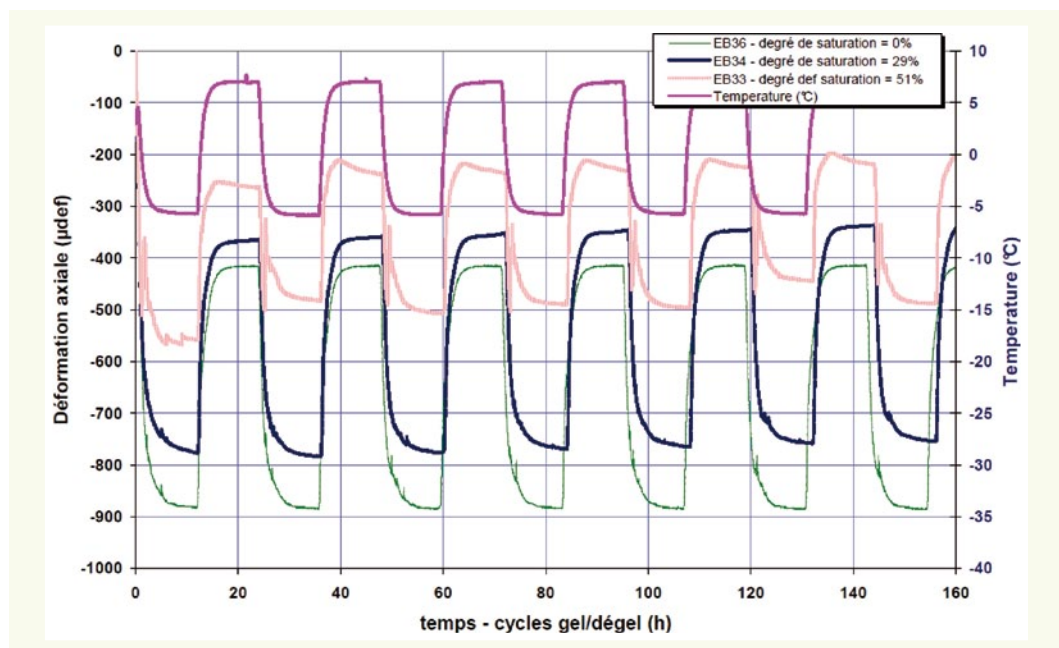


figure 13
Évolution de la température et de la déformation avec les cycles thermiques.

Cette figure compare les déformations thermiques des trois éprouvettes saturées à différents degrés, en fonction des cycles de gel/dégel. La déformation thermique est fixée arbitrairement à zéro à la température de début d'essai +10°C.

Pour l'éprouvette sèche (EB-36), la variation de ε^T est quasi-proportionnelle aux variations de température enregistrées au cours des cycles, en refroidissement comme en réchauffement. La valeur obtenue pour le coefficient de dilatation linéique moyen de l'échantillon EB-36, à l'intérieur du domaine de variation de température (+10°C / -5°C), est de $34.10^{-6} \text{ K}^{-1}$. Cette valeur située dans la fourchette de valeurs annoncées dans la bibliographie (Di Benedetto et Neifar, 1997), ce qui permet de valider l'ensemble du dispositif de mesure et de correction, fondé sur l'emploi du barreau de silicate.

Quand l'essai est réalisé sur l'échantillon faiblement saturé en eau, EB-34, le coefficient α_m diminue un peu pour atteindre la valeur de $30 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$. Quand le degré de saturation atteint 51 % (EB-33), le coefficient α_m (apparent), mesuré sur cette même plage de température, diminue plus radicalement vers la valeur de $23 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$. Il est alors intéressant d'examiner plus en détail l'évolution des déformations à l'échelle d'un cycle.

Ces courbes sont détaillées sur la **figure 14**. Elles représentent l'évolution de la déformation enregistrée sur chaque échantillon, pendant les sept premières heures du premier cycle où la température est monotone décroissante.

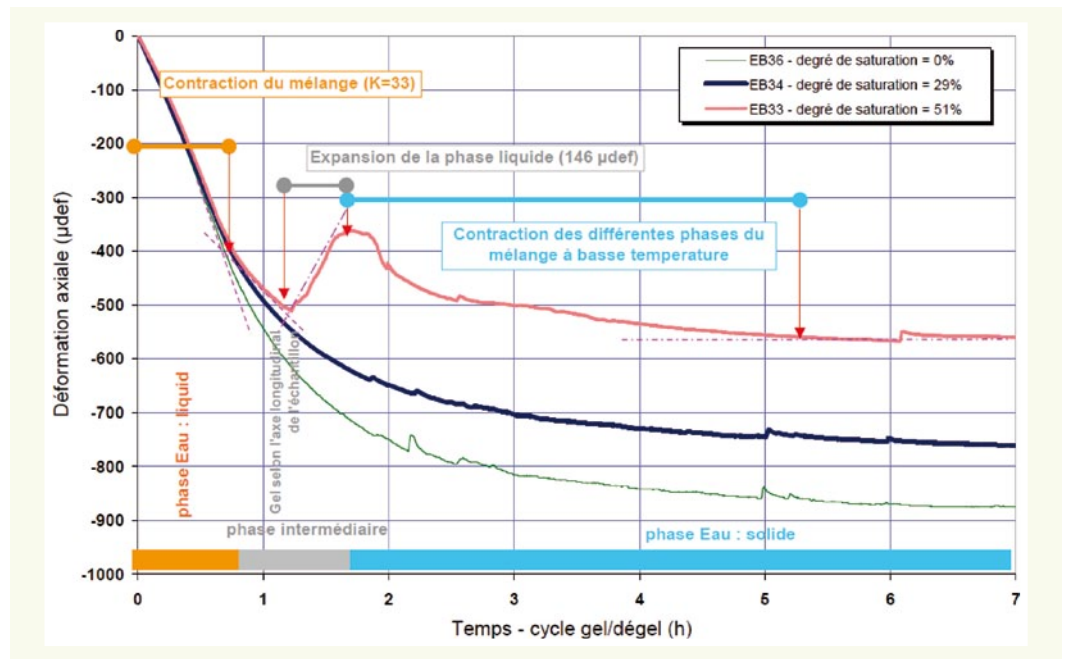


figure 14
Effet du degré de saturation sur la contraction et la dilatation de l'échantillon

On note la différence très nette de comportement des échantillons EB-33 et EB-36. L'échantillon sec EB-36 subit une déformation monotone décroissante, quasi homothétique à la courbe de température, pour atteindre en phase de plateau thermique une déformation d'environ 880 µdef. L'échantillon EB-33, saturé à 51 %, présente quant à lui une évolution en trois temps. Aux températures positives, sa déformation est quasiment confondue avec celle de l'échantillon sec. Sur la période suivante, pendant laquelle la température passe au-dessous de 0°C, sa vitesse d'évolution ralentit (en valeur absolue) jusqu'à passer assez subitement à une phase de gonflement significative de l'ordre de 150 µdef, mesurée à partir du creux de la courbe d'évolution. Il reprend ensuite une évolution contractante plus ou moins parallèle à celle de l'échantillon sec. Au final, les deux courbes se retrouvent décalées d'une valeur de l'ordre de 300 µdef (gonflement + différence creusée avant gonflement), ce dont rend compte la différence observée ci-avant sur les coefficients de dilatation moyen. L'échantillon EB-34, saturé à 29 %, se comporte qualitativement comme l'échantillon sec, sans présenter d'expansion au passage à température nulle. Néanmoins, la présence d'eau se manifeste par une diminution de la vitesse de déformation, conduisant à un écart d'environ 100 µdef.

Ces essais mettent donc bien en évidence un effet caractéristique de gonflement des enrobés au passage du front de gel, lorsque leur saturation en eau dépasse un certain seuil. Cet effet est à attribuer, comme dans les sols, au changement de phase « eau liquide vers glace », de l'eau contenue dans les pores, qui s'accompagne à pression constante d'une dilatation volumique d'environ 10 %.

En revanche avant et après le passage du front de gel, le comportement thermo-mécanique de l'enrobé EB-33 est identique à celui d'un solide, dont les déformations sont proportionnelles à la variation de température. Qui plus est, les coefficients de dilatation au cours de ces phases restent voisins de ceux de l'enrobé sec ; à température positive, la saturation partielle de l'échantillon

(et les conditions d'écoulement libre aux limites) permet d'absorber sans effet le différentiel de dilatation important entre liquide et solide ; à basse température, lorsque la transition liquide/glace s'est opérée, la relativement faible quantité de glace présente au sein de la matrice solide masque le différentiel de dilatation entre la glace et la phase minérale de l'enrobé.

Autrement dit, le comportement observé sur l'éprouvette EB-33 peut se traduire schématiquement par les équations :

$$\varepsilon^T = \alpha(\theta - \theta_i) \text{ si } \theta > 0 \quad (3)$$

$$\varepsilon^T = \alpha(\theta - \theta_i) + \varepsilon_{\text{gonflement}}(S_r) \text{ si } \varepsilon^T = \alpha(\theta - \theta_i), \quad (4)$$

en supposant pour simplifier que le gonflement $\varepsilon_{\text{gonflement}}$ s'opère brutalement à température nulle et que les coefficients de dilatation de l'enrobé aux températures strictement positives et négatives sont égaux. La déformation $\varepsilon_{\text{gonflement}}$ est fonction du degré de saturation de l'enrobé ; elle est nulle pour $S_r = 0$ et croît avec le taux de saturation.

L'évolution plus progressive des déformations réellement mesurées sur l'échantillon EB-33 traduit sans doute un gonflement plus progressif que celui supposé ici, mais résulte sans doute aussi en partie de la longueur finie et relativement importante des jauges disposées perpendiculairement à la direction de propagation du front de gel – Voir encart)

MODÉLISATION DU SIGNAL DES JAUGES DANS LE CADRE DES ÉQUATIONS [3], [4]

Notons l la longueur des jauges et $z_f(t)$ la position du front de gel, supposé d'extension verticale nulle et coïncider avec la condition $\theta(z, t) = 0$. D'après les équations [3] et [4], en considérant les instants pour lesquels le front de gel est situé entre le bas et le haut de la jauge :

$$\begin{aligned} \varepsilon^T_{\text{jauge}}(t) &= \frac{1}{l} \left(\int_{z_{\text{bas}}}^{z_f(t)} \alpha(\theta(z, t) - \theta_i) dz + \int_{z_f(t)}^{z_{\text{haut}}} (\alpha(\theta(z, t) - \theta_i) + \varepsilon_{\text{gonflement}}(S_r)) dz \right) \\ &= \frac{1}{l} \int_{z_{\text{bas}}}^{z_{\text{haut}}} \alpha(\theta(z, t) - \theta_i) dz + \varepsilon_{\text{gonflement}}(S_r) \frac{z_{\text{haut}} - z_f(t)}{l} \end{aligned}$$

En termes de vitesse de déformation, on en déduit :

$$\frac{d\varepsilon^T_{\text{jauge}}(t)}{dt} = \frac{\alpha}{l} \int_{z_{\text{bas}}}^{z_{\text{haut}}} \frac{\partial \theta}{\partial t}(z, t) dz + \varepsilon_{\text{gonflement}}(S_r) \frac{v_f}{l} = \alpha \frac{d\bar{\theta}}{dt} + \varepsilon_{\text{gonflement}}(S_r) \frac{v_f}{l}$$

avec $\bar{\theta}$ = température moyenne sur la longueur de la jauge,

v_f = vitesse du front de gel (comptée positivement vers le bas).

Lorsque le front de gel est au-dessus ou au-dessous de la jauge : $\frac{d\varepsilon^T_{\text{jauge}}(t)}{dt} = \alpha \frac{d\bar{\theta}}{dt}$.

Ainsi, pendant le temps où la jauge est traversée par le front de gel, la déformation résulte du terme $\alpha \frac{d\bar{\theta}}{dt}$, négatif en phase de refroidissement, et du terme $\varepsilon_{\text{gonflement}}(S_r) \frac{v_f}{l}$, positif lorsque le front descend.

Ce dernier terme peut donc inverser momentanément le sens de variation de la mesure, si le taux de saturation du matériau et la déformation de gonflement associée sont suffisamment élevés (cas de l'éprouvette EB-33).

L'évolution montrée par l'éprouvette EB-34 correspondrait au cas intermédiaire d'un taux de saturation et d'une déformation de gonflement associée insuffisants pour inverser le taux d'évolution de la déformation mesurée, mais suffisant pour en ralentir significativement l'évolution.

Des simulations plus précises, en utilisant par exemple le logiciel GEL1D d'ALIZE ou le module GEL de CESAR-LCPC, permettraient d'affiner la comparaison mesures/modèle et de mieux quantifier les valeurs des paramètres en jeu.

■ Conclusions des essais sur enrobés bitumineux

Ces premiers résultats d'essai de gel/dégel sur enrobés sont probants quant au comportement singulier des enrobés possédant de fortes saturations en eau. Ils mettent notamment en évidence des gonflements soudains et significatifs, se produisant au voisinage du front de gel, de l'ordre de 150 à 300 microdéformations – suivant le mode de détermination considéré - pour une éprouvette saturée à 51 %.

On peut penser que de tels phénomènes puissent se traduire *in situ*, en conditions gênées, par des détériorations subites des chaussées. Un gonflement empêché au sein de couches assujetties à rester planes est en effet de nature à générer des contraintes internes de cisaillement, voire de traction, aptes à produire des décollements entre couches ou à décohesionner les matériaux et à former des nids de poule. Le comportement thermo-mécanique différentiel de matériaux de nature distincte ou présentant des degrés de saturation en eau différents pourrait, le cas échéant, accentuer les phénomènes.

De futurs essais de laboratoire de gel/dégel sur des structures d'enrobés bicouches sont prévus afin d'investiguer cet aspect. Il sera également intéressant de caractériser le comportement viscoélastique d'enrobés à forte teneur en eau soumis à l'effet du gel, afin d'identifier une éventuelle perte de leur faculté de relaxation, qui contribue dans les conditions usuelles à modérer le développement de contraintes internes. Par ailleurs, des essais « pied dans l'eau » permettront d'évaluer les risques d'augmentation de la saturation des enrobés bitumineux par effet de cryosuccion en présence de « sources » d'eau proches (ex : infiltrations en cas d'alternance de phases de gel/dégel avec précipitations).

4. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Afin de répondre aux interrogations des gestionnaires de réseaux concernant les réparations durables à mettre en place et les risques d'apparition de nouvelles dégradations sur des zones non encore affectées, il est nécessaire de comprendre le ou les mécanismes de ces dégradations. Les circonstances d'apparition de ces désordres conduisent à distinguer parmi ceux-ci un mécanisme réglé et rapide de départ de plaques de matériau en surface de chaussées et des mécanismes d'endommagement de plus long terme ayant pu intervenir à des températures plus usuelles, voire élevées, et ayant pu préparer « le terrain » à la formation des nids de poule. Le mécanisme rapide serait à considérer dans ce cas comme révélateur de situations limites, consécutives à des combinaisons déficientes de choix de matériaux routiers, de stratégies d'entretien et d'exploitation.

Dans la quête des mécanismes de long terme, l'instrumentation mise en place dans les couches de surface d'une structure du manège de fatigue du LCPC a révélé par température élevée la présence de glissements significatifs entre couches, même parfaitement collées (Vulcano-Greullet et al., 2010). Ceci pourrait constituer aux côtés d'autres causes (ex : désenrobage en présence d'eau) un mécanisme d'endommagement des interfaces qui, s'il était confirmé par d'autres mesures, pourrait conduire à recommander la limitation du nombre d'interfaces dans les stratégies d'entretien et à spécifier des valeurs minimales d'épaisseur des couches.

Un mécanisme susceptible quant à lui d'expliquer le caractère soudain de ces désordres, lié spécifiquement aux transitions gel/dégel, a été mis au jour dans les enrobés bitumineux, partiellement saturés en eau. Libre de contraintes mécaniques, ceux-ci sont sujets à des effets de gonflement significatifs et soudains au passage d'un front de gel. Les essais menés dans l'opération Fondephy ont permis de mesurer des gonflements significatifs de l'ordre de 150 (voire 300 microdef en différentiel avec un enrobé sec) pour une éprouvette saturée à 50 % environ au moment du gel. Dans le cas d'une structure de chaussée multicouches, où un tel mécanisme serait gêné, celui-ci pourrait générer des contraintes internes aptes à décohesionner les matériaux au voisinage de leurs interfaces (Mauduit et al., 2010). Cette hypothèse mérite d'être approfondie par d'autres mesures et

essais de laboratoire, à pratiquer non seulement sur matériaux homogènes, mais aussi sur des structures multicouches, afin de déterminer l'impact réel du phénomène parmi l'ensemble des autres paramètres impliqués dans ces désordres.

Le corpus normatif et technique français doit faire face au vieillissement du réseau routier et aux pathologies et enjeux qui l'accompagnent. Les désordres apparus au cours de ces derniers hivers montrent que la méthode utilisée depuis de nombreuses années en France n'est pas sans faille. Lorsque les phénomènes auront été bien identifiés et compris, il conviendra peut être d'intégrer de nouveaux essais de formulation des matériaux, avec conditionnements thermiques de type gel/dégel, et de faire en sorte que les méthodes de conception, dimensionnement et entretien prennent mieux en considération le fonctionnement des interfaces aux diverses températures et les risques d'accumulation d'eau au sein des chaussées. À cet égard, il serait intéressant de disposer d'une méthode d'auscultation à grand rendement non destructive, permettant de détecter rapidement les zones fragiles, avant travaux d'entretien (Castaneda Pinzon, 2004 ; Castaneda et Such, 2004). Il conviendra peut-être également d'intensifier le recours aux techniques d'investigations « radar » ou « Colibri » (Simonin et Lièvre, 2006), non seulement pour vérifier le collage des couches ou leur épaisseur, mais pour déceler la présence d'eau piégée.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient Jean-Luc Delorme pour son appui lors des travaux présentés dans cet article.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- BOUTONNET M., LIVET J.** (1990). Rapport interne sur l'effet du salage sur les températures de surface, Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées de Nancy.
- CASTANEDA PINZON E.A.** (2004). *Contribution de méthodes non destructives à l'évaluation de l'effet de l'eau sur les enrobés bitumeux*, Thèse de Doctorat de l'Université de Nantes.
- CASTANEDA E., SUCH C.** (2004). Evaluation of moisture sensitivity of bituminous mixtures by a complex modulus approach, *Transportation Research Record : Journal of the Transportation Research Board*, 1891, TRB, National Research Council, Washington D.C., pp. 62-67.
- DELORME J.L. ET AL.** (2007). *Manuel LPC d'aide à la formulation des enrobés à chaud*, Études et Recherches des Laboratoires des Ponts et Chaussées, LCPC.
- DI BENEDETTO H., NEIFAR M.** (1997). Coefficients de dilatation et de contraction thermiques d'un enrobé bitumineux avec et sans chargement mécanique, *Mechanical Tests for Bituminous Materials*, Di Benedetto & Francken Editors.
- FROMM H.J., PHANG W.A., NOGA M.** (1965). *The incidence of stripping and cracking of bituminous pavements in Ontario*. Proceedings of Canadian technical asphalt association, Vol. 10, pp. 157-179
- HAMMOUM F., HORNBYCH P.** (2004). Quantitative study of bituminous materials microstructure by digital image analysis. *Proceedings, 3rd Eurobitume & Euroasphalt congress*, Vienne (Autriche).
- HICKS R.G.** (1991). *Moisture damage in asphalt concrete*. National cooperative highway research program : synthesis of highway practice, Report 175.
- KANDHAL P.S., LUBOLD C.W., ROBERTS F.L.** (1989). Water damage to asphalt overlays : cases histories. *Meeting of the Association of Asphalt Paving Technologists*, National Center for Asphalt Technology Nashville (Tennessee).
- KANDHAL P., RICKARDS I.** (2001). Premature failure of asphalt overlays from stripping : cases histories. *Proceedings of the Association of Asphalt Paving Technologists*, Clearwater (Floride). Volume 70, pp. 301-343.
- MAUDUIT C., HAMMOUM F., PIAU J.M., MAUDUIT V., LUDWIG S., HAMON D.** (2010). Quantifying dilation effects induced by freeze-thaw cycles in partially water saturated bituminous mix : Laboratory experiments. *Road Materials and Pavement Design, EATA special issue*, Parme Italie.
- MAUDUIT C., MAUDUIT V.** (2006). Rapport d'étape n° 1, *Opération Fondephy du LCPC*.
- 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.
- SÉTRA-LCPC** (1997). *French design manual for pavement structures*. Laboratoire Central des Ponts et Chaussées and Service d'Études Techniques des Routes et Autoroutes.
- SIMONIN J.M., LIÈVRE D.** (2006). Compte rendu des essais Colibri – mesures sur la RN4 près de Ménil-la-Horgne (Meuse) du 21 au 23 mars 2006, LCPC.
- VULCANO-GREULLET N., KERZREHO J.P., CHABOT A., MAUDUIT V.** (2010). Stripping phenomenon of top layers of thick pavements. *Congrès ISAP2010*, Nagoya, Japan.

