



Projet National de recherche et développement

RAPPORT DE RECHERCHE N°1/ LIVRABLE

**Étude bibliographique sur l'endommagement
des enrobés bitumineux à l'eau et au gel**

Auteur(s) / Organisme(s) :

TRAN Duc Thang – ENTPE

SAUZEAT Cédric – ENTPE

DI BENEDETTO Hervé – ENTPE

Thème de rattachement :

Thème 1.5 – Mécanismes de dégradation des chaussées

Dégradations hivernales

Numéro de rapport (à établir par l'IREX)

N° lettre de commande : LC/17/DVDC/09

Date : 01/03/2018

Site internet : www.dvdc.fr

Plateforme collaborative : www.omnispace.fr/dvdc

Président : Dominique JAUMARD

Directeurs : Eric LAYERLE et Christine LEROY

Gestion administrative et financière : IREX (www.irex.asso.fr), 9 rue de Berri 75008 PARIS, contact@irex.asso.fr

Sommaire

Sommaire	2
1 Résumé	3
2 Introduction	5
3 Sollicitation des couches routières en enrobés bitumineux	7
3.1 Effet du trafic	7
3.2 Effets des conditions climatiques	7
3.2.1 Effet de la température	8
3.2.2 Effet de l'eau	8
3.2.3 Effet des cycles de gel/dégel	9
3.2.4 Effet du rayonnement ultraviolet (UV)	Erreur ! Signet non défini.
3.3 Effet de la saumure	10
4 Comportements des matériaux bitumineux	12
4.1 Grandes classes de comportement	12
4.2 Influence des phénomènes climatiques sur le comportement des matériaux	12
4.2.1 Introduction : Positionnement du problème	12
4.2.2 Micro-mécanismes expliquant les détériorations observées	13
4.2.2.1 Mécanismes des dégradations en présence d'eau	13
4.2.2.2 Mécanismes du vieillissement	16
4.2.3 Synthèse des résultats dans la littérature	17
4.2.3.1 Conditionnement avec l'eau	17
4.2.3.2 Conditionnement avec cycles gel/dégel sans eau	19
4.2.3.3 Conditionnement avec cycles gel/dégel en présence d'eau	20
4.2.3.4 Oxydation due au vieillissement des matériaux	30
5 Conclusion	34
6 Références	36

1 Résumé

Résumé en français

Ce rapport constitue le premier rapport intermédiaire de la thèse de Doctorat de TRAN Duc Thang, réalisée à l'École Nationale des Travaux Publics de l'État (ENTPE). Cette thèse est cofinancée par le projet national DVDC et l'entreprise Eurovia. Elle contribue aux travaux du sous-thème 1.5, sur les dégradations hivernales, du thème 1 du projet national sur les mécanismes de dégradation des chaussées. Elle s'intéresse à l'endommagement des enrobés bitumineux à l'eau et au gel.

En effet, depuis quelques dernières années, des phénomènes de désenrobage des matériaux bitumineux constituant les couches de chaussée apparaissent massivement dès la sortie de l'hiver. Ces dégradations causent la formation rapide de nids de poule, affectant essentiellement la couche de surface. Elles semblent fortement liées à une combinaison de l'infiltration de l'eau et l'effet des cycles de gel/dégel. L'objectif de la thèse est d'apporter une meilleure compréhension des conditions conduisant à de telles dégradations.

Dans le cadre de la thèse, une étude bibliographique sur l'endommagement des enrobés bitumineux à l'eau et au gel a été réalisée. Elle est présentée dans ce rapport. Elle introduit tout d'abord les sollicitations auxquelles sont soumises les chaussées routières en enrobé bitumineux (telles que : effet du trafic, effets des conditions climatiques et effet de la saumure) et les différentes classes de comportements des enrobés bitumineux (viscoélastique, fatigue, thermomécanique). L'étude bibliographique se concentre ensuite sur l'influence des phénomènes climatiques, en particulier, sur l'effet de l'eau et des cycles gel/dégel (GD) sur les différents types de comportement. Les essais utilisant les conditionnements avec l'eau et avec cycles gel/dégel dans la littérature sont étudiés et leurs résultats sont présentés dans cette revue bibliographique.

Mots-clés : *Enrobé bitumineux, eau, gel-dégel, module complexe, fatigue, couplage thermomécanique.*

Abstract

This report is the first interim report of the PhD works of TRAN Duc Thang, conducted at the "École Nationale des Travaux Publics de l'État" (ENTPE). This PhD thesis is co-funded by the national project DVDC and Eurovia company. PhD works contribute to the sub-theme 1.5 dealing with winter degradations included in Theme 1 of the national project, on the mechanisms of pavement degradation. PhD thesis studies damages in bituminous mixes caused by water and freeze/thaw cycles.

In recent years, stripping phenomena of bituminous materials constituting pavement layers appear massively at the end of winter. This leads rapidly to the formation of potholes. These degradations seem to be due to a combination of water infiltration and the effect of freeze / thaw cycles. PhD thesis aims at providing a better understanding of the conditions leading to such degradations.

A literature review on the effect of water and frost on bituminous mixtures was carried out as a first part of the thesis. It is the subject of this report. Firstly, the different loads acting on asphalt road pavements are presented (such as: the effect of traffic, the effects of climatic conditions and the effect of brine) as well as the different bituminous mixture behaviours (viscoelastic, fatigue, thermomechanical). The literature review then focuses on the influence of climatic phenomena, in particular on the effects of water and freeze / thaw cycles (GD) on bituminous mixture behaviours. Testing methods using water conditioning and freeze / thaw cycles, described in the literature, are studied and their results are presented in this report.

Keywords: *Bituminous mixtures, water, freeze/thaw, complex modulus, fatigue, thermomechanical coupling.*

2 Introduction

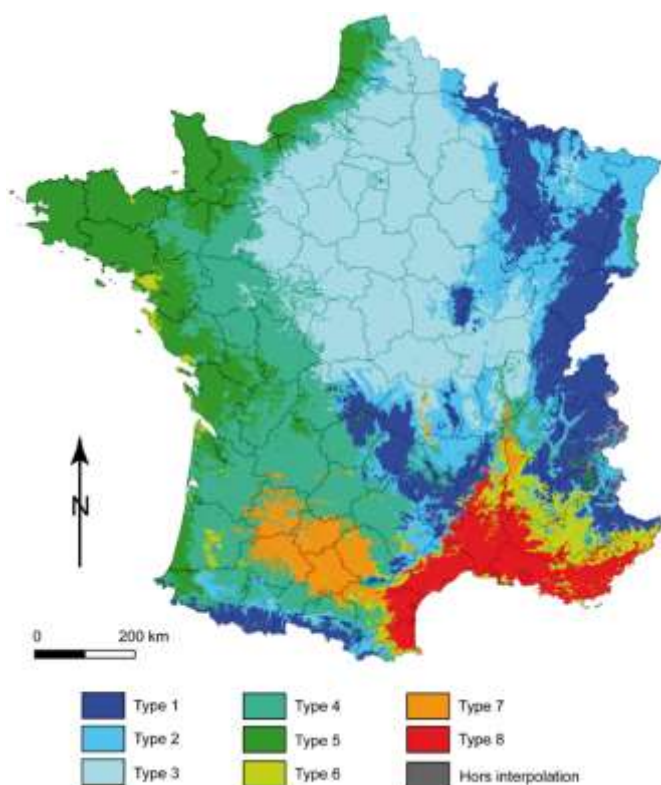
La France possède un grand réseau routier de plus d'un million de kilomètres (URF, 2016). Il est principalement constitué de matériaux bitumineux choisis pour former des structures routières épaisses, semi-rigides ou mixtes. Soumis à des sollicitations externes telles que le trafic et le climat, ces structures routières subissent des dégradations affectant notamment les couches de roulement qui supportent directement la charge des véhicules et les conditions climatiques sévères. Ces couches peuvent être renouvelées plusieurs fois par remplacement ou par recouvrement. Depuis quelques années, des phénomènes de désenrobage apparaissent massivement dès la sortie de l'hiver et sont aggravés dans des régions soumises au gel telles que: les zones nordiques et de montagne en France (Mauduit, et al., 2007) (Corté & Garnier, 2010), les pays scandinaves, le Canada (Lamothe, 2014), la Chine (Feng, et al., 2010) ou les États-Unis (Robert A., et al., 1989). Ces dégradations prennent la forme de nids de poule, de « départs en plaque » ou « pelade » de la couche de roulement. La particularité de ces dégradations est d'apparaître dans de brefs délais et sans signe avant-coureur spécifique (Mauduit, et al., 2013).



Figure 2-1. Désordres dans une chaussée du nord-est de la France (a) Carotte de la structure de chaussée, (b) Chapelets de nids de poule pluri-décimétriques (Mauduit, et al., 2013)

Un problème se pose : « Comment éviter les dégradations hivernales des réseaux routiers? ». Pour répondre à cette question, beaucoup de recherches ont été réalisées aux États-Unis sur le comportement des enrobés bitumineux, en présence d'humidité, soumis à des conditions climatiques variables (chaud/ froid) dès le début des années 2000 ((Hicks, et al., 2003), (Solaimanian, et al., 2003), (Mercado, 2007), (Caro S., 2009), etc.). Pourtant, les études sur ce sujet restent encore limitées en France. Les travaux menés dans le cadre de l'opération de recherche de l'Ifsttar « FondePhy » de 2006 à 2009 ont permis d'investiguer en détail quelques cas de terrain et d'apporter des pistes de réponse à la question posée ((Mauduit, et al., 2007), (Mauduit, et al., 2010) (Mauduit, et al., 2013)). Ce problème est de plus en plus étudié en Chine depuis une dizaine d'années, comme en témoigne le nombre d'articles d'auteurs chinois publiés sur ce sujet ((Feng, et al., 2010), (Xu, et al., 2015), (Lei, et al., 2016), (Yang, et al., 2016), etc.).

Malgré les résultats obtenus, les phénomènes à l'origine des dégradations observées in-situ demeurent mal connus ou peu expliqués. Il convient de souligner en outre, qu'une grande partie de la France est soumise à un climat de montagnes ou un climat nordique, qui possèdent plus de 25 jours de température minimale inférieure à -5°C et moins de 4 jours de température maximum supérieur à 30°C , avec un cumul de précipitation annuelle de moins de 700mm (Figure 2-2). C'est la raison pour laquelle les études sur la dégradation hivernale sont nécessaires.



- Type 1 : climat de montagne
- Type 2 : climat semi-continental et climat des marges montagnardes
- Type 3 : climat océanique dégradé des plaines du Centre et du Nord
- Type 4 : climat océanique altéré
- Type 5 : climat océanique franc
- Type 6 : climat méditerranéen altéré
- Type 7 : climat du Bassin du Sud-Ouest
- Type 8 : climat méditerranéen franc

Figure 2-2. Typologie climatique du territoire français en 8 classes (Joly, et al., 2010)

Dans ce rapport bibliographique, une première partie introduit les diverses sollicitations auxquelles sont soumises les chaussées, en lien avec les conditions hivernales (le trafic, le climat et la saumure utilisée lors des opérations de déverglaçage). Une deuxième partie présente le comportement des matériaux bitumineux et s'intéresse à l'effet de l'eau et des cycles de gel/dégel sur leur comportement, à travers les différentes études menées dans la littérature.

3 Sollicitation des couches routières en enrobés bitumineux

Les structures routières sont soumises à diverses sollicitations mécaniques, thermiques et chimiques couplées. Durant la vie des chaussées, ces sollicitations peuvent se combiner et causer des détériorations dans les couches routières. Elles sont liées aux contraintes mécaniques générées par le passage des véhicules (effet du trafic), aux effets créés par les changements du climat (effets climatiques) et aux actions de l'entretien hivernal des chaussées (effet de la saumure). Dans les paragraphes suivants, ces effets sont présentés indépendamment et de façon couplée.

3.1 Effet du trafic

Les couches de chaussées subissent des écrasements et des flexions sous l'effet du trafic (Figure 3-1). La répétition des chargements dus au trafic peut aboutir à des microfissures qui s'accumulent et entraînent le développement de fissures à travers le matériau, puis à travers les couches de chaussées. En particulier, la fissuration à la surface de la chaussée favorise les infiltrations d'eau. Ces dernières peuvent conduire à la réduction de portance du support, au décollement des couches et à une accélération de la dégradation des matériaux (Di Benedetto & Corté, 2005)

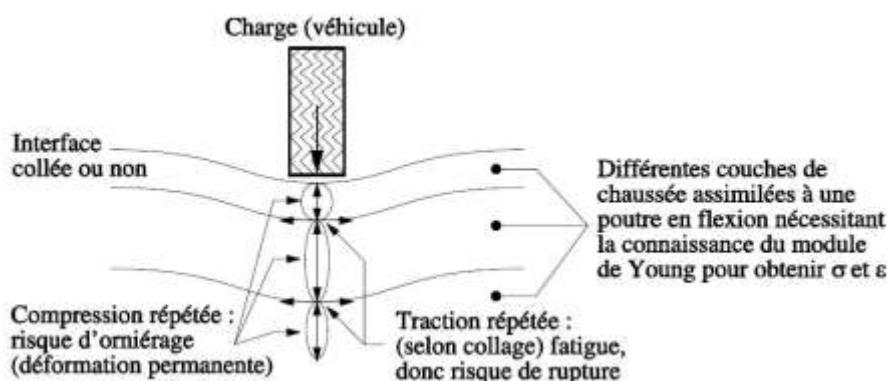


Figure 3-1. Schématisation des sollicitations induites par le trafic sous une roue (Di Benedetto & Corté, 2005)

Les compressions répétées sous l'effet des charges créent également des déformations permanentes qui induisent parfois un orniérage à la surface de la chaussée. Cet orniérage peut être dû aux déformations des couches d'enrobés bitumineux mais également aux tassements différentiels des couches non liées inférieures éventuelles.

3.2 Effets des conditions climatiques

Les conditions climatiques en France donnent lieu à différents phénomènes météorologiques influençant le comportement des chaussées, tels que la température, les précipitations, l'humidité, l'effet du soleil, du vent etc. Ces conditions climatiques engendrent des effets qui peuvent être néfastes tels que le vieillissement du liant hydrocarboné, le changement de la rigidité du matériau, la création de microfissures générant des endommagements dans les enrobés bitumineux.

Dans les paragraphes suivants, les effets qui affectent le plus le comportement des revêtements bitumineux sont présentés. Ce sont : l'effet de la température, l'effet de l'eau, l'effet des cycles de gel/dégel et l'effet du vieillissement.

3.2.1 Effet de la température

La température a deux effets mécaniques principaux :

1. Changement de rigidité (module) du matériau. Un enrobé bitumineux que l'on chauffe devient plus « mou », par contre à basse température il présente les caractéristiques d'un matériau plus « dur ».
2. Création de contraintes et déformations dues aux dilatations-contractions thermiques différées de chacune des couches lors des changements de température (Figure 3-2).

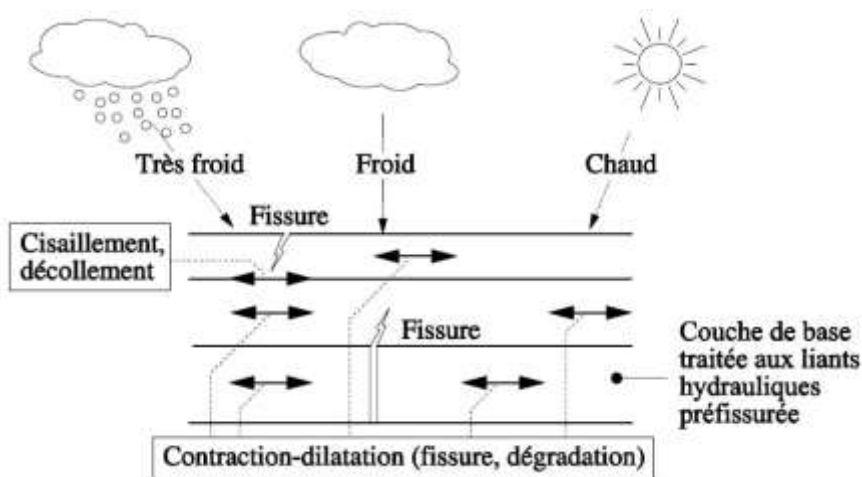


Figure 3-2. Schématisation des sollicitations induites par la température dans les structures routières (Di Benedetto & Corté, 2005)

3.2.2 Effet de l'eau

La présence d'eau au sein des matériaux des revêtements routiers s'explique par les trois modes d'apparition suivants : 1) infiltration des pluies, formation de neige et écoulement de l'eau ; 2) remontée d'eau en raison des forces capillaires ou du phénomène de pompage généré par le trafic ; 3) pénétration et condensation de la vapeur d'eau (Castaneda Pinzon, 2004).

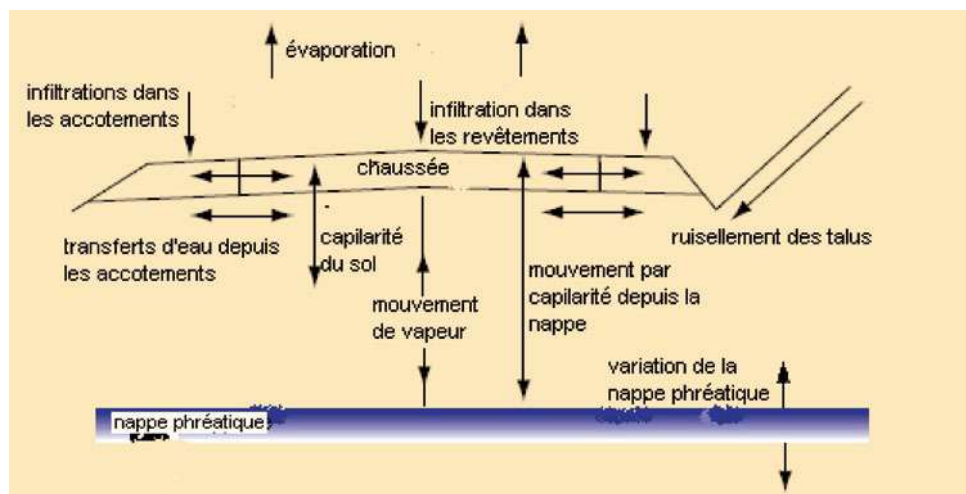


Figure 3-3. Circulation d'eau dans la plate-forme et la chaussée (Castaneda Pinzon, 2004)

La présence d'eau cause des dégradations au sein des enrobés bitumineux. L'eau est à l'origine de plusieurs effets néfastes : la perte d'adhésivité entre le bitume et les granulats, la perte de cohésion du film bitumineux et/ou la rupture des agrégats, en particulier lorsqu'ils sont soumis au gel (Terrel & Al-Swailmi, 1994), (Bagampadde, et al., 2004), (N. Kingros, 2008), (Caro S., 2009) (Mehrara & Khodaii, 2013).

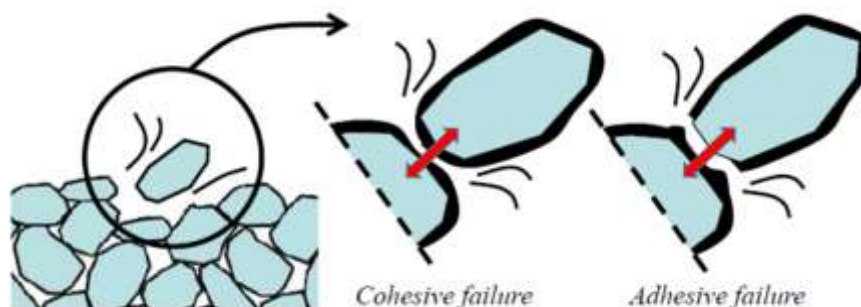


Figure 3-4. Décollement des enrobés due à des pertes d'adhésivité et de cohésion des composants (N. Kingros, 2008)

3.2.3 Effet des cycles de gel/dégel

Selon (Corté & Garnier, 2010) et (Mauduit, et al., 2013), il est estimé qu'un revêtement routier subit de 500 à 1200 cycles gel/dégel (GD) pendant sa durée de vie de 12 à 15 ans (les données utilisées ont été mesurées sur la route nationale 57 dans les Vosges). Comme le montre la Figure 3-5 (Mauduit, et al., 2013), plus d'une dizaine de cycles GD ont été enregistrés au mois de janvier 2010 au centre de la France. Cela signifie que les chaussées dans cette zone ont subi 10 à 15 cycles de GD pendant ce mois d'hiver.

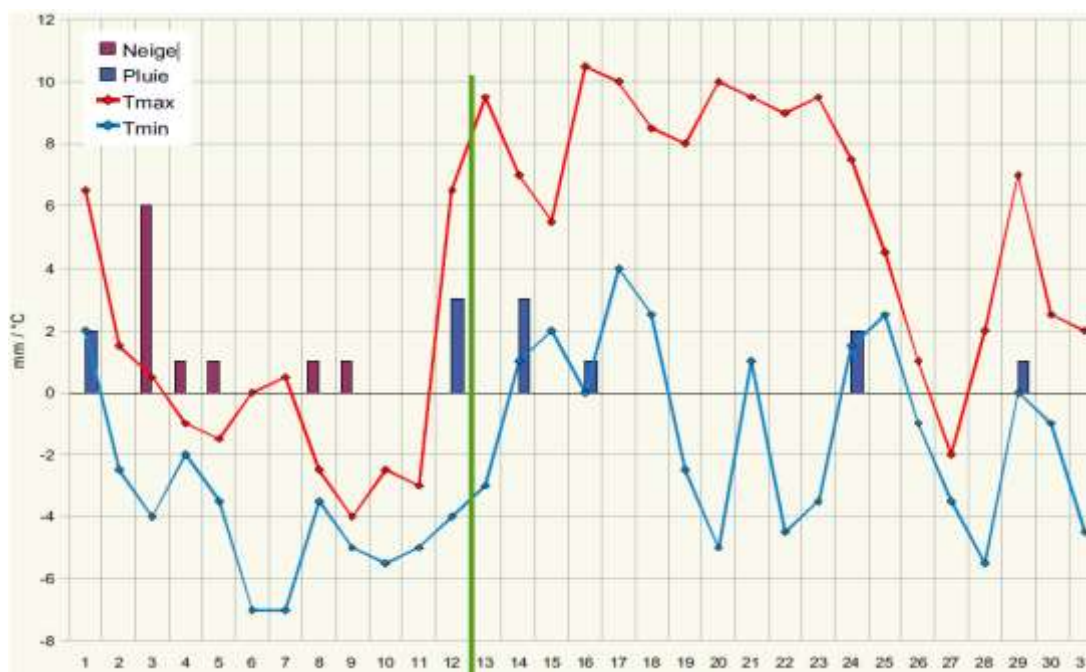


Figure 3-5. Relevé météorologique de janvier 2010 issu de la station de Météo France située au centre de la France tiré depuis (Mauduit, et al., 2013)

De plus, de nombreux cycles quotidiens de gel/dégel rencontrés sur le terrain sont accompagnés par des précipitations sous forme liquide ou de neige (AIPCR, 2012). Ces cycles de GD, qui apparaissent en hiver au centre de la France ou dans les régions montagneuses, ont généralement des amplitudes de température variant entre -10°C et 15°C

(Figure 3-6). D'après (Mauduit, et al., 2007), une température basse peut facilement engendrer la solidification de l'eau stockée dans les vides des couches de chaussées après les périodes de pluie ou de neige. Sous des cycles de GD, ce phénomène peut induire des contraintes élevées (1 à 3MPa) et répétées qui causent un endommagement des enrobés bitumineux. Ce phénomène peut donc générer une chute irréversible de rigidité ou accélérer le désenrobage des revêtements routiers qui sont à l'origine des dégradations hivernales telles que les nids de poule (Robert A., et al., 1989).

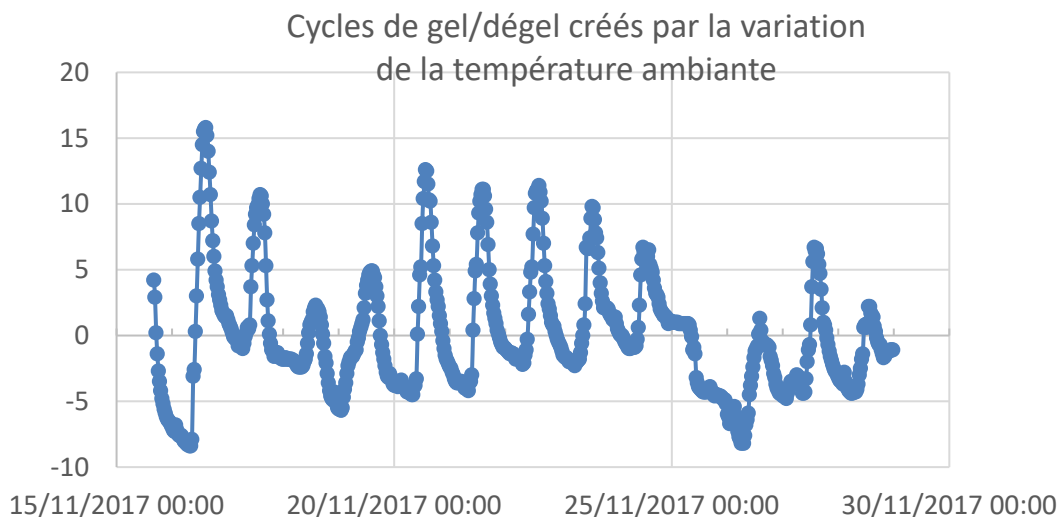


Figure 3-6. Relevés de température dans la couche de surface d'une chaussée à côté de Genève du 15/11/2017 au 28/11/2017 (données EUROVIA)

3.2.1 Effet du rayonnement ultraviolet (UV)

Un autre aspect important est le vieillissement des matériaux bitumineux. Au cours du temps, le bitume s'oxyde. Ce phénomène est accéléré par des températures élevées, ou l'action du rayonnement ultraviolet. Le vieillissement a comme effet un durcissement des matériaux bitumineux en raison de l'oxydation et de l'exposition au rayonnement UV. Il existe toujours un gradient de vieillissement diminuant avec la profondeur de la structure routière. Celui-ci est dû au fait que les matériaux situés à différentes profondeurs dans les chaussées ne sont pas soumis au même niveau d'exposition à l'oxygène et au rayonnement ultraviolet à long terme.

En fait, les dégradations dues à l'humidité et le vieillissement se produisent simultanément pendant la durée de vie d'une structure de chaussée et les deux phénomènes interagissent entre eux. Le durcissement combiné avec le gradient de vieillissement accélère les mécanismes d'endommagement lié à l'humidité, et contribue à affaiblir les liens cohésifs et adhésifs du mastic et du bitume avec l'agrégat (Das, 2014).

3.3 Effet de la saumure

En hiver, l'utilisation de produits de déverglçage est nécessaire pour l'entretien routier. L'ajout de produit de déverglçage permet d'abaisser le point de congélation de l'eau et diminue donc l'effet de solidification de l'eau qui est une des causes de dégradation hivernale. Lamothe, 2014 a montré que le seul effet d'une saumure de NaCl sur l'endommagement viscoélastique suite à des cycles de Gel-dégel, était l'abaissement de la température de congélation qui ne dépend que de la concentration en sel. En France, on utilise différents produits de déverglçage tels que : les chlorures, les alcools, des sels de l'acide acétique, l'urée ou les formiates. Parmi eux, les sels chlorures comme NaCl₂, CaCl₂ ou MgCl₂ sont largement utilisés en raison de leur disponibilité, leur coût et leur efficacité. Cependant, l'utilisation des sels peut avoir des effets néfastes comme : le choc thermique ou l'effet du gradient de concentration du sel.

Le choc thermique est provoqué par l'usage des sels directement sur les couches de glace et de verglas, donc seulement lors d'un traitement curatif. La réaction endothermique entre le sel et la glace peut causer une diminution brutale de la température d'environ 3 degrés pendant quelques minutes selon (Mauduit, et al., 2013). La Figure 3-7 montre un exemple de la variation thermique mesurée à la surface et à différentes profondeurs, -2cm, -4cm et -6cm d'une plaque testée suite à un salage de 40 g/m² sur une épaisseur de verglas de 2 mm.

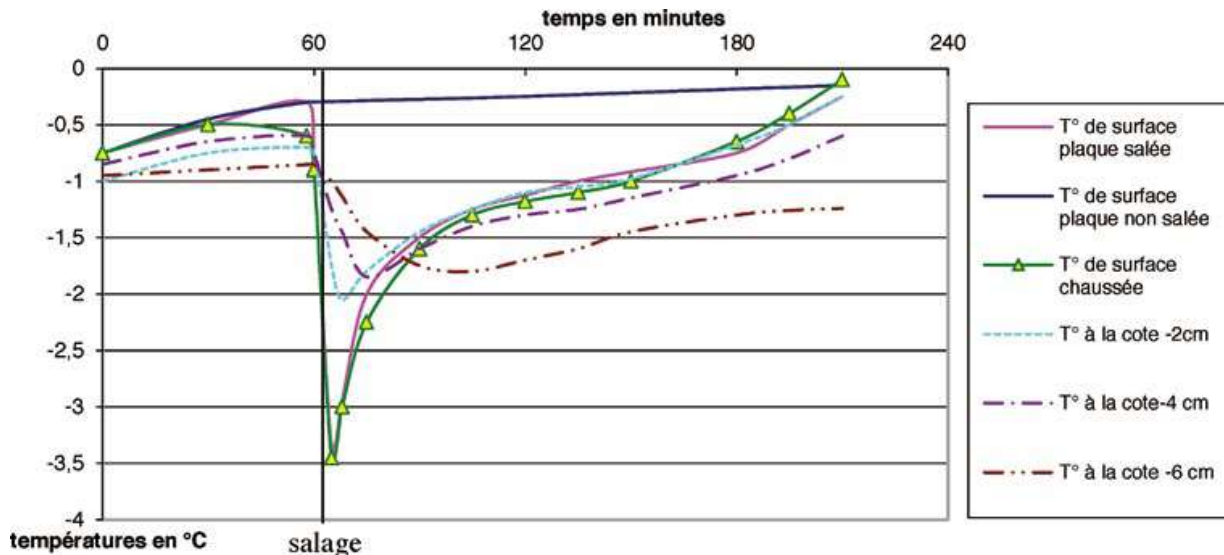


Figure 3-7. Choc thermique dû au salage d'une couche de verglas préexistant sur la chaussée selon (Boutonnet et Livret 1990) tiré depuis (Mauduit, et al., 2013)

L'autre effet causé par l'application de sel est l'effet de gradient de concentration en sel lorsque la saumure pénètre de façon non-homogène dans la chaussée. La forte concentration se trouve normalement au fond et diminue au fur à mesure vers la surface de la chaussée. Selon (Doré, et al., 1997), ce phénomène entraîne la formation non-homogène de glace au sein de la structure routière soumise à des cycles de gel/dégel et peut accélérer la fissuration des chaussées.

4 Comportements des matériaux bitumineux

4.1 Grandes classes de comportement

Le comportement des enrobés bitumineux est complexe. Ils présentent différents types de comportement en fonction des sollicitations imposées. Malgré le comportement complexe des enrobés, il est possible d'identifier généralement quatre grandes types de comportements principaux en considérant l'amplitude de la déformation (ϵ) et le nombre de cycles de chargement appliqué (N) (Figure 4-1) :

- ▶ Pour des chargements comprenant quelques centaines de cycles et des déformations de « faibles amplitudes » ($\epsilon < 10^{-4}$ m/m) le comportement est considéré, en première approximation, viscoélastique linéaire.
- ▶ Pour un faible nombre de chargements et des déformations de quelques pourcents, on observe un comportement fortement non-linéaire.
- ▶ Lors de chargements de plusieurs milliers de cycles sous faibles déformations, des phénomènes d'endommagement apparaissent, le matériau se fatigue.
- ▶ Lorsque des cycles déviatoires en contraintes sont appliqués à partir d'une contrainte nulle, des déformations irréversibles non négligeables se produisent pour des amplitudes de déformation « proches » de la rupture. Leur accumulation crée de l'orniérage.

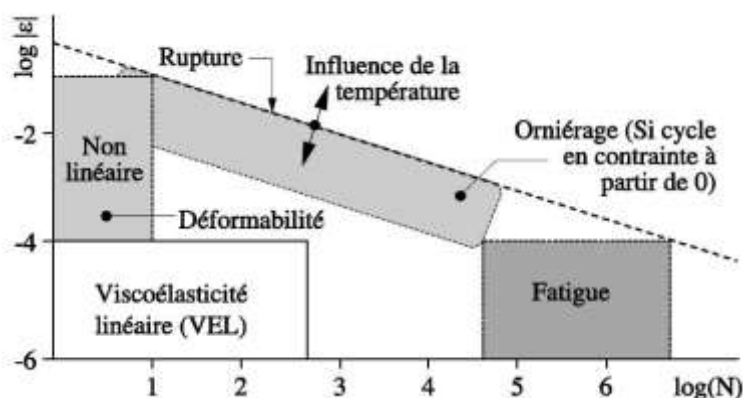


Figure 4-1. Comportements des enrobés bitumineux à température fixée, (ϵ) déformation - (N) nombre de chargements (Di Benedetto & Corté, 2005)

4.2 Influence des phénomènes climatiques sur le comportement des matériaux

4.2.1 Introduction : Positionnement du problème

Les conditions climatiques peuvent avoir des effets néfastes sur le comportement des matériaux bitumineux. Par exemple, la présence d'eau peut diminuer fortement la résistance et la durée de vie des revêtements bitumineux du fait de la perte d'adhésivité et de cohésion au sein des matériaux. Ces dégradations sont parfois accélérées par l'effet du vieillissement et des cycles de gel/dégel.

Différents essais ont été développés afin d'évaluer l'aptitude des enrobés à résister à ce type de dégradations. Après différents conditionnements, les matériaux sont testés, par exemple, en utilisant l'essai Marshall, l'essai de Lottman, l'essai Duriez etc. qui utilisent la traction indirecte ou la compression simple. Ces essais sont uniquement relatifs à la rupture en sollicitation monotone tandis que les comportements viscoélastiques et celui à la fatigue sont peu testés pour évaluer leur évolution avec ce type de dégradations. C'est la raison pour

laquelle les évolutions des différents types de comportements des enrobés bitumineux sous les effets de l'eau, des cycles GD et du vieillissement sont encore peu connues (Figure 4-2).

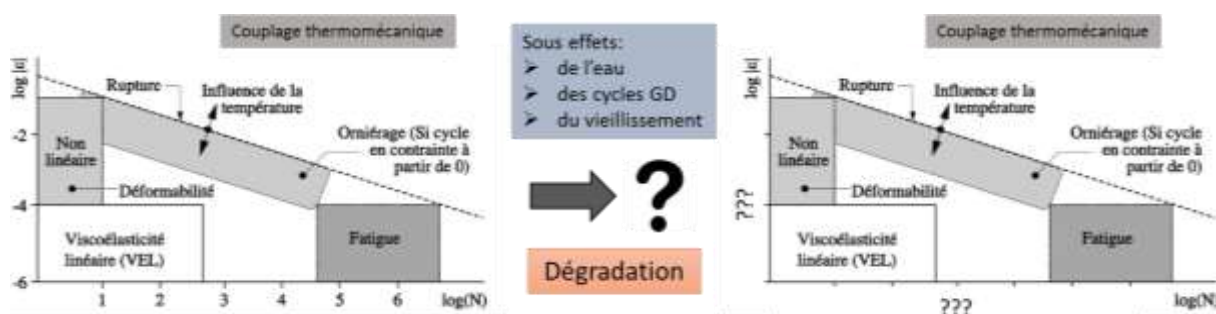


Figure 4-2. Question: comment les effets étudiés influencent-ils les différents types de comportements des enrobés bitumineux ?

Une revue bibliographique est présentée dans les parties suivantes afin de clarifier, en quelque sorte, l'influence des effets étudiés sur les comportements mécaniques des enrobés bitumineux.

4.2.2 Micro-mécanismes expliquant les détériorations observées

Cette section a pour but de présenter des mécanismes expliquant les détériorations des enrobés bitumineux en présence d'eau (avec ou sans période de gel) et dues au vieillissement.

4.2.2.1 Mécanismes de dégradation en présence d'eau

La dégradation en présence d'eau des enrobés bitumineux a été étudiée depuis les années 1920 (Solaimanian, et al., 2003). Selon (Mehrara & Khodaii, 2013), (Kakar, et al., 2015), il y a deux grands mécanismes expliquant les dégradations des revêtements bitumineux: (a) la perte d'adhésivité entre le bitume et les granulats ; (b) la perte de cohésion au sein des composants.

a) Mécanismes de perte d'adhésivité

L'adhésivité caractérise la capacité collante du bitume aux granulats. 4 phénomènes complémentaires, à l'origine des 4 théories présentées ci-dessous, sont avancés pour expliquer l'adhésion entre le bitume et les granulats :

- ▶ Théorie mécanique : L'adhésion d'un bitume à un granulat est premièrement créée par une interaction de nature mécanique : liaison mécanique du bitume qui s'insère dans le relief du granulat. Elle dépend fortement des caractéristiques physiques des granulats.
- ▶ Théorie chimique : Une réaction chimique se produit entre les fractions du bitume adsorbé par le granulat et les constituants du granulat. Le bitume possédant des composants plutôt à caractère acide (par exemple, on note la présence d'acides naphthéniques), il se lie chimiquement plus facilement avec des granulats de nature basique, donc à haute teneur en carbonate de calcium, tels que le marbre et le calcaire, plutôt qu'avec des granulats à caractère acide comme le quartz, le granite, les grès et les porphyres qui sont composés de silicates (Lamothe, 2014).
- ▶ Orientation moléculaire : Les molécules du bitume, notamment les groupes polaires, s'orientent de manière à satisfaire les besoins énergétiques de la surface du granulat. L'orientation des molécules est possible lorsque le bitume est chaud. La majorité des groupes fonctionnels du bitume sont composés de charges négatives. En conséquent, l'orientation des molécules entre les composants est favorisée lorsque des granulats chargés positivement sont utilisés. Alors, l'interaction électrostatique entre les deux surfaces est générée par l'attraction des charges électriques opposées : forces de type polaires, liaisons hydrogène ou interactions de Van der Waals.

- ▶ Théorie thermodynamique : L'énergie de surface constitue le facteur prédominant au niveau de l'adhésivité. L'adhésivité résulte des forces intermoléculaires qui sont reliées à l'énergie libre de surface en présence des matériaux suivants : bitume, granulats, eau et air. Grâce à la comparaison entre l'énergie d'adhésion et l'énergie de cohésion des composants, on peut évaluer le mouillage du bitume sur les granulats qui joue un rôle essentiel à la performance de l'enrobé bitumineux (Corté & Di Benedetto, 2005).

En se basant sur ces théories, de nombreuses recherches ont été réalisées afin de mieux comprendre le phénomène de perte d'adhésivité des enrobés bitumineux en présence d'eau. Selon les revues bibliographies de (Bagampadde, et al., 2004), (Caro S., 2009), (Feng, et al., 2010), (Mehrra & Khodaii, 2013), (Lamothe, 2014), (Xu, et al., 2015), il existe différents mécanismes de dégradations, qui sont présentés dans le Tableau 4-1.

Tableau 4-1. Mécanismes de dégradation par la perte d'adhésivité

Mécanisme	Phénomène	Causes
Décollement	Séparation microscopique du film de bitume de la surface du granulats par un film d'eau, sans dommage apparent au film de bitume.	<ul style="list-style-type: none"> - Granulats poussiéreux ; - Granulats qui n'ont pas été suffisamment séchés avant l'enrobage, l'eau dans les pores interstitiels se vaporise et condense à la surface du granulats emprisonné sous le film de bitume ; - Gradient de concentration de part et d'autre du film de bitume qui provoque le déplacement de l'eau vers la surface du granulats. Ce phénomène génère le désenrobage ; - Réaction chimique et électrostatique.
Déplacement	Perte du bitume de la surface des granulats par une rupture du film de bitume et/ou une séparation du granulats/mastic	<ul style="list-style-type: none"> - Enrobage incomplet lors du malaxage ; - Granulats très anguleux : usure ou film de bitume très mince aux arrêtes ; - Granulats très fragmentés après le compactage ; - Présence de poussières à la surface du granulats ; - Cycles de gel et dégel fréquents ; - Faible énergie de surface d'adhésivité ; - Composant chimique hydrophile du bitume ; - Composition minéralogique globale hydrophile ; - Incompatibilité entre le bitume et le granulats qui mène à la solubilité d'un composant par l'eau ; - pH élevé de l'eau.
Désorption	Lavage du liant ou mastic par un écoulement d'eau qui peut être accentué par le trafic.	<ul style="list-style-type: none"> - Perméabilité élevée de l'enrobé bitumineux ou du film de bitume ; - Passages de véhicules.
Émulsion spontanée	L'eau et le bitume se combinent pour former une émulsion inverse, le bitume forme la phase continue et l'eau la phase discontinue. Le mécanisme est réversible lorsque l'eau s'évapore, toutefois il peut s'amplifier avec le trafic et peut conduire au décollement total du film de bitume s'il atteint la surface du granulats.	<ul style="list-style-type: none"> - Immersion prolongée dans l'eau ; - Présence de certains produits anti-désenrobage ; - Composant chimique hydrophile du bitume ; - Présence de certains fillers minéraux ; - Présence de minéraux de carbonate hydrophile ; - Présence de particules argileuses ; - Faible énergie de cohésion à l'interface ; - pH élevé de l'eau, qui affecte l'angle de contact, le mouillage et la tension de l'interface bitume-eau, et ainsi, l'adhérence du couple bitume-grulats.

b) Mécanismes de perte de cohésion

La cohésion est définie comme l'ensemble des forces qui unissent les molécules d'un même corps.

La perte de cohésion des enrobés bitumineux est associée à une détérioration au sein des composants. Deux niveaux de perte de cohésion ont été observés : au niveau du bitume ou du mastic qui est le plus fréquemment observé, et au niveau des granulats. Le Tableau 4-2 tiré de (Lamothe, 2014) résume les mécanismes de perte de cohésion observés.

Tableau 4-2. Mécanismes de dégradation par la perte de cohésion

Mécanisme	Phénomène	Causes	Niveau
Vaporisation et succion	Lors d'un réchauffement, l'évaporation de l'eau (vapeur) contenue dans les vides semi-effectifs accélère la diffusion de l'eau au sein de la microstructure du bitume et lors du refroidissement, il peut y avoir une succion d'eau au sein des vides s'il y a présence d'un film d'eau à l'embouchure en raison de l'existence d'un gradient de pression.	<ul style="list-style-type: none"> - Présence d'eau au sein de l'enrobé ; - Température ou ensoleillement élevés et refroidissement de l'enrobé. 	Bitume, mastic (N. Partl, et al., 2018)
Dispersion	Perte de cohésion du bitume ou du mastic en raison d'une exposition prolongée à l'eau et une perte de matériau en raison d'un mouvement d'eau généré par le passage des véhicules.	<ul style="list-style-type: none"> - Présence prolongée d'eau ; - Écoulement d'eau ; - Énergie faible de cohésion à l'interface ; - Composant chimique hydrophile du bitume ; - Bitume vieilli ; - Film mince de bitume. 	
Pression dans les pores	Le déplacement de l'eau dans les vides interconnectés de la microstructure de l'enrobé et le développement d'une pression interstitielle élevée de l'eau au sein des vides isolés saturés générés par le passage d'un véhicule provoque la rupture du film de bitume ou la propagation de microfissures au sein du mastic. Ces dommages vont faciliter l'infiltration d'eau dans le mastic et à l'interface bitume-granat et conduire au désenrobage et à la désintégration complète de l'enrobé.	<ul style="list-style-type: none"> Ségrégation entre deux couches ou teneur élevée en vides permettant l'infiltration et la circulation d'eau ; - Densification de l'enrobé par le trafic emprisonnant l'eau dans des vides isolés, alors que le matériau est saturé non drainé ; - Trafic mettant sous pression l'eau au sein des vides isolés, sollicitant le matériau en traction et le liant entre les granulats au point de les désenrober. 	

Rupture du film de bitume, microfissures	Rupture du film de bitume, de mastic ou de granulats générant une perte d'intégrité structurelle de l'enrobé et générant ainsi de nouvelles voies d'accès pour le transport de l'humidité. Le mécanisme se produit usuellement là où les arêtes sont vives, où le film de bitume est mince et où il y a de la poussière sur le granulat.	La rupture peut être accentuée par les : - opérations de fabrication, de mise en œuvre et de compactage ; - passages de véhicules ; - cycles de gel et dégel.	
Solidification de l'eau	La solidification de l'eau contenue dans les pores de l'enrobé peut générer des contraintes de 1 à 3 MPa et ainsi fragiliser le film de bitume, le granulat ou l'enrobé. Cette fragilisation se produit essentiellement à l'interface granulat-bitume.	- Présence d'eau au sein de l'enrobé ; - Température froide générant la formation de glace.	Granulat
Solubilité	La perte de cohésion au sein du granulat due à la solubilité de certains composés.	pH < 6 et > 8 de l'eau est favorable à la dissolution, respectivement, de minéraux carbonatés et siliceux.	

4.2.2 Mécanismes du vieillissement

Les mécanismes du vieillissement se classent selon trois types : type physique, type chimique et type cinétique (Dony & Ziyani, 2016):

D'un point de vue physique, la manifestation la plus notable du vieillissement est le durcissement du liant. Celui-ci est dû à une restructuration physique moléculaire lors du refroidissement de l'enrobé après sa mise en œuvre. Le vieillissement physique est également dû à une modification de la composition générique du liant: la fraction en asphaltènes augmente et les fractions huileuses légères du liant sont perdues par volatilité ou adsorption. Enfin, les paraffines peuvent cristalliser.

D'un point du vue chimique, l'oxydation est provoquée par l'exposition à l'oxygène de l'air. Le processus d'oxydation peut être décrit à travers trois phénomènes. Le premier est la fragmentation, au cours de laquelle les molécules de bitume se séparent en plus petits fragments générant des sous-produits volatils tels que H₂O, CO₂ et CH₄ qui se vaporisent à la fin du processus. Le deuxième phénomène est l'ajout d'oxygène dans le bitume lors du refroidissement de l'enrobé. Le troisième phénomène est la formation de molécules plus dense et plus lourde, appelée la condensation ou la carbonisation. La perte de molécules volatiles et l'association de grandes molécules augmentent la viscosité du bitume ce qui explique son durcissement (Petersen, 1993). Les particules minérales ou bien les fillers dans le mastic peuvent aussi agir comme un catalyseur du processus de vieillissement du bitume (Das, 2014).

D'un point de vue cinétique, la vitesse de formation des carbonyles est régie selon une loi exponentielle d'Arrhenius dépendant de la température, de la pression et du type de liant. Les études en laboratoire de (Lau, et al., 1992) et (Petersen, et al., 1993) ont montré qu'initialement, la vitesse de formation est rapide, puis diminue au cours du temps et atteint une valeur constante.

4.2.3 Synthèse des résultats dans la littérature

De nombreuses recherches ont été réalisées pour étudier l'impact des effets de l'eau sur les enrobés bitumineux selon des protocoles différents qui peuvent être regroupés comme suit : (1) conditionnement avec l'eau, (2) conditionnement avec l'eau et sous des cycles de gel/dégel, (3) conditionnement sans eau et sous des cycles de gel/dégel. Dans les paragraphes suivants, nous décrivons, tout d'abord, certains protocoles de conditionnement. Puis nous présentons les résultats obtenus en soulignant les impacts de ces protocoles sur les grandes classes de comportement des enrobés bitumineux, tel que la résistance à la rupture, la fatigue, la viscoélasticité et le comportement sous couplage thermomécanique.

4.2.3.1 Conditionnement avec l'eau

Plusieurs essais permettant d'évaluer la sensibilité à l'eau des enrobés bitumineux ont été développés. Ils sont généralement classés en 2 groupes : les essais sur le mélange bitumineux foisonnés et les essais sur des éprouvettes compactées (Solaimanian, et al., 2003). Malgré la diversité de ces essais, le conditionnement avec l'eau utilise principalement deux méthodes, soit l'éprouvette est immergée simplement dans l'eau, soit elle est saturée dans l'eau sous vide.

Le Tableau 4-3 présente des essais utilisant l'immersion directe dans l'eau.

Tableau 4-3. Essais avec l'immersion dans l'eau

Type d'échantillon	Essai	Conditionnement des éprouvettes	Paramètre obtenu
Mélange d'enrobé (Solaimanian, et al., 2003) (Bagampadde, et al., 2004)	Static immersion test	Mettre le mélange à 60°C pendant 2h et laisser refroidir à température ambiante ; puis immerger dans l'eau à 25°C pendant 16h à 18h	Pourcentage de la surface des agrégats encore revêtue par le bitume, estimé visuellement (ou à l'aide de photographies)
	Dynamic immersion test	Similaire au test précédent en ajoutant une agitation durant 4 heures quand le mélange est immergé dans l'eau	
	Texas boiling test	Immerger le mélange 10min dans l'eau bouillante	
	Rolling bottle test	Agiter le mélange dans une bouteille d'eau à la température ambiante	
Eprouvette compactée	Immersion-compression test (AASHTO T165, 2002)	Deux méthodes : (1) Immerger des éprouvettes dans l'eau à 60°C (140°F) pendant 24h, puis dans l'eau à 25°C pendant 2h (2) Immerger des éprouvettes dans l'eau à 49°C (120°F), puis à 25°C pendant 2h	Rapport des résistances à la compression des éprouvettes avec et sans conditionnement
	Marshall test (NF EN 12697-34, 2012)	Immerger des éprouvettes dans l'eau à 60°C pendant 40mins	Rapport des stabilités de Marshall des éprouvettes avec et sans conditionnement
	Moisture vapor susceptibility (California Test 307, 2000)	Mettre des éprouvettes couvertes dans un moule aluminium étanche équipé avec une mèche qui est suspendu au-dessus de l'eau dans une enceinte à 60°C pendant 75h.	Rapport des valeurs de « stabilometer de Hveem » des éprouvettes avec et sans conditionnement

	Hamburg wheel test (AASHTO T324, 2014)	Immerger des éprouvettes dans l'eau en appliquant des cycles de chargement d'un pneu afin d'obtenir la courbe déformation permanente - nombres des cycles, à une température choisie	Nombre de cycles correspondant au point d'intersection de la pente de la seconde et la troisième partie de la courbe de fluage (le point de décollement)
--	--	--	---

De plus, il existe des essais sur des éprouvettes compactées utilisant la saturation sous vide, comme illustré dans le Tableau 4-4.

Tableau 4-4. Essais avec la saturation sous vide

Type d'échantillon	Essai	Conditionnement des éprouvettes	Paramètre étudié
Eprouvette compactée	Sensibilité à l'eau (NF EN 12697-12, 2008)	Méthode A : Saturation sous vide de 6.7 kPa à 20 ± 5°C pendant 30min, attente de 30min minimum, puis immersion dans un bain d'eau à 40°C pendant 3 jours.	Rapport entre les résistances à la traction indirecte des éprouvettes avec et sans conditionnement
		Méthode B : Saturation sous vide de 47 kPa à 18°C pendant 2h, puis immersion dans un bain d'eau à 18°C pendant 7 jours.	Rapport entre les résistances à la compression des éprouvettes avec et sans conditionnement

Parmi ces essais, les tests sur les mélanges bitumineux foisonnés sont moins appliqués du fait de la faible corrélation observée avec les résultats obtenus à partir des essais sur les éprouvettes compactées. En France, la norme européenne (NF EN 12697-12, 2008) est généralement appliquée pour tester la sensibilité à l'eau des enrobés bitumineux. Selon cette norme, il est possible d'utiliser deux essais sur éprouvette compactée présentés dans le Tableau 4-4. Parmi eux, la Commission Technique Essais relatifs aux Chaussées (CTEC) recommande l'utilisation du test de compression, également appelé le test « Duriez » (Méthode B). L'essai utilise des échantillons cylindriques ayant un rapport hauteur sur diamètre d'au moins 0.5. Le rapport entre la résistance à la compression simple des éprouvettes conditionnées et celle des éprouvettes non-conditionnées est ensuite calculé (équation (4-1)) et considéré pour estimer la sensibilité à l'humidité du matériau.

$$i/C = \frac{C_w}{C_d} \quad (4-1)$$

Où C_w et C_d sont les résistances moyennes (au moins 8 éprouvettes testées) à la compression respectivement des éprouvettes conditionnées et des éprouvettes non-conditionnées.

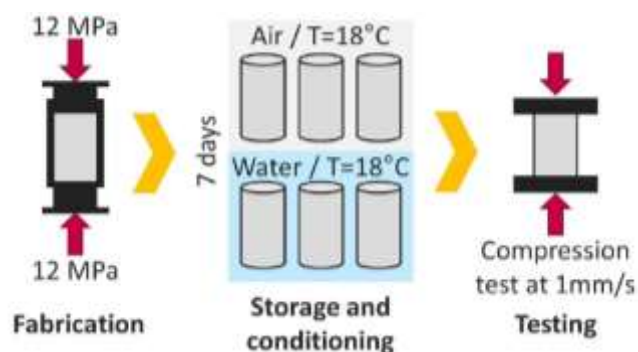


Figure 4-3. Schéma du principe de test selon la méthode "Duriez" tirée de (Ramirez Cardona, 2016)

Le matériau est considéré sensible à l'humidité quand le rapport i/C est inférieur à 70%, 80% ou 90% selon le matériau testé (NF EN 13108-1, 2007). D'après la norme (NF EN 12697-12, 2008), le test a été répété par 14 laboratoires différents sur un BBSG-EB10, la valeur moyenne de l'expérimentation a été de 73% avec une répétabilité et une reproductivité acceptables : 7.8% et 13.4% respectivement.

D'après notre étude bibliographique, aucun essai de module complexe sur des enrobés bitumineux ayant subi de tels conditionnements n'a été réalisé. Cependant, le comportement à la fatigue des enrobés bitumineux saturés en eau a été étudié par (Lamothe, 2014) lors de sa thèse de doctorat. Le matériau utilisé est un enrobé bitumineux de type EB 14 selon la norme du Québec avec 4.8% de teneur en bitume PG 70- 28. Des éprouvettes cylindriques 80x120mm (diamètre x hauteur) ayant 4.4% de vides en moyenne ont été carottées dans des plaques de 125x400x600 mm³ obtenues au compacteur de type LPC, au moins 2 semaines après sa fabrication.

Deux lots d'éprouvettes, dont un lot sec et l'autre conditionné, ont été testés. Le système de saturation sous vide a été utilisé. Les éprouvettes conditionnées ont été saturées partiellement dans de l'eau dégazée sous une pression absolue inférieure à 4kPa, pendant une durée d'au moins 90 minutes. Après un délai maximal de 36 heures suite à la saturation, elles ont été testées à la fatigue en traction-compression à 10°C et 10Hz. La courbe de Wöhler obtenue est tracée dans la Figure 4-4.

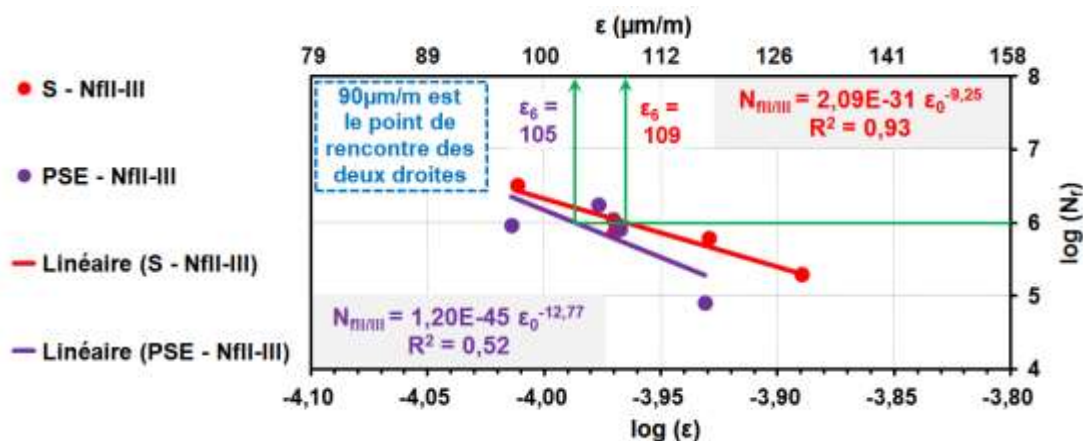


Figure 4-4. Courbes de fatigue de Wöhler de l'enrobé bitumineux (teneurs en vide de 3,5 à 4,5%), testé à deux états Sec (S) et Partiellement Saturé en Eau (PSE), à +10°C et 10Hz (Lamothe, 2014)

La présence d'eau au sein de l'enrobé génère une baisse de la valeur de la déformation ϵ_0 ($105 \mu\text{m/m}$ vs $109 \mu\text{m/m}$), et une hausse de la pente de la droite de fatigue (12,77 au lieu de 9,25). L'enrobé bitumineux testé, partiellement saturé en eau sous vide, présente cependant une très faible diminution de la résistance à la fatigue bien que le degré de saturation obtenu soit élevé (environ 90%). Cette faible diminution est peut-être due à la faible teneur en vide des éprouvettes.

4.2.3.2 Conditionnement avec cycles de gel/dégel sans eau

Lamothe (Lamothe, 2014), (Lamothe, et al., 2017)) a également réalisé une étude sur des éprouvettes compactées soumises à des cycles de gel/dégel (GD) sans eau.

Une éprouvette de 4.8% de vide a été choisie pour tester l'impact des cycles GD sur le comportement viscoélastique linéaire (VEL) de l'enrobé bitumineux. Six essais de module complexe (E^*) ont été réalisés après 1, 3, 10, 30, et 60 cycles GD sur l'éprouvette testée (Figure 4-5). La Figure 4-6 montre la sollicitation en température lors du conditionnement selon (Lamothe, et al., 2017). Les cycles de GD sont entre -18°C et 10°C.

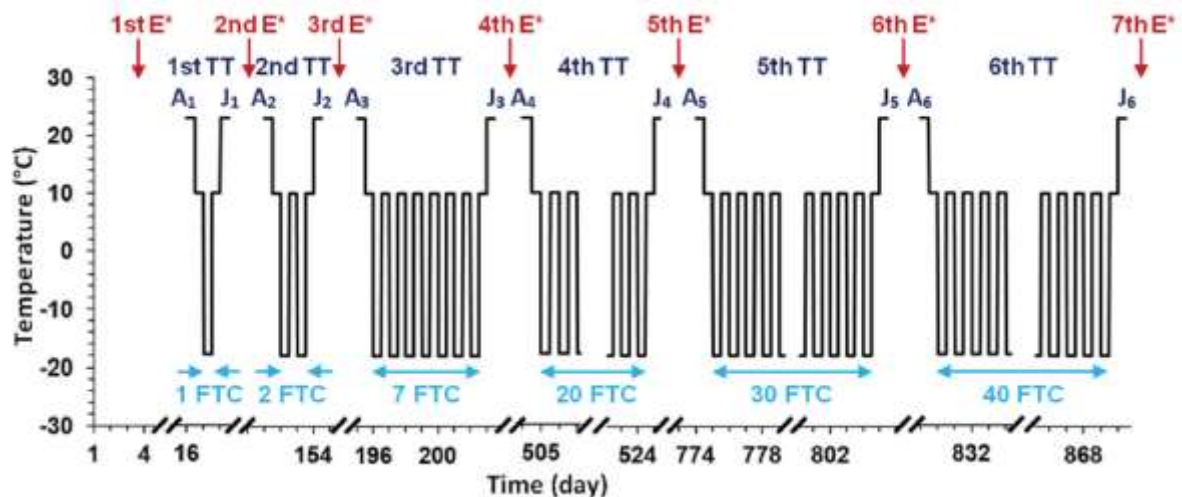


Figure 4-5. Réalisation des essais de module complexe qui incluent les séquences de cycles de gel et dégel (Lamothe, et al., 2017) (Freeze-Thaw Cycles - FTC, Thermal Test - TT, Complexe Modulus - E*)

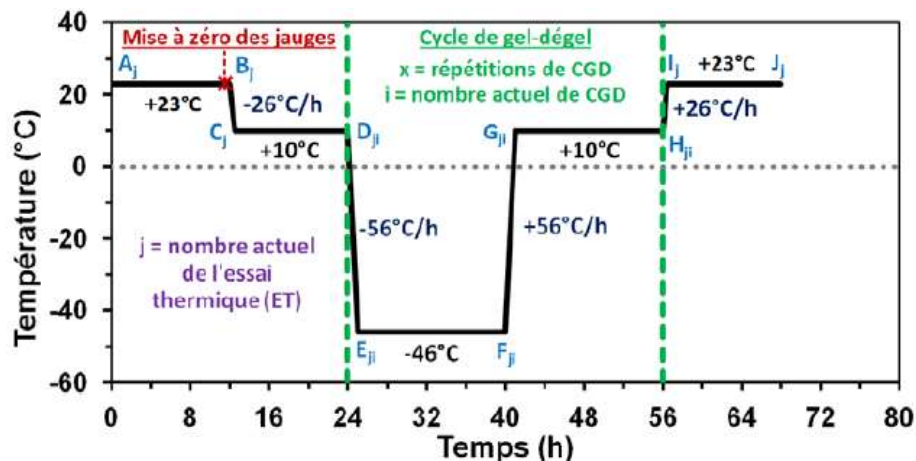


Figure 4-6. Sollicitation d'un cycle de gel/dégel selon (Lamothe, 2014) (Essai thermique – ET)

Les données obtenues (Figure 4-7) ont montré une faible dégradation de l'enrobé utilisé soumis au conditionnement des cycles GD sans eau, même après 60 cycles GD. Il semble que les cycles GD n'ont pas eu d'influence significative sur le comportement VEL du matériau testé.

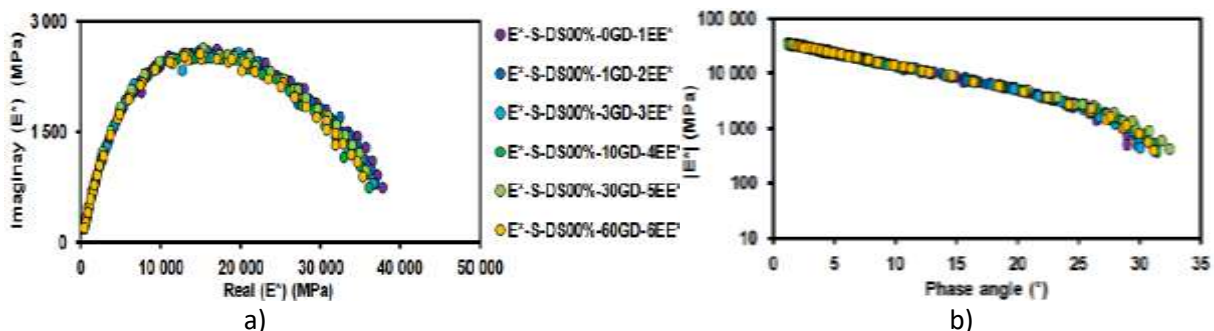


Figure 4-7. Résultats des essais de module complexe sur une éprouvette sèche ayant subi 0, 1, 3, 10, 30 et 60 cycles GD cumulés : (a) dans le plan Cole-Cole ; (b) dans l'espace de Black (Lamothe, 2014)

4.2.3.3 Conditionnement avec cycles gel/dégel en présence d'eau

Selon la littérature, la plupart des recherches traitent de l'endommagement des enrobés bitumineux causé par des cycles de gel/dégel en présence d'eau. Ce type de conditionnement a été d'abord développé par (Lottman, 1978). Il a proposé une procédure en deux étapes :

l'éprouvette est d'abord saturée dans l'eau sous vide, puis elle subit un cycle GD (cf. Tableau 4-5). Cette procédure a été modifiée plus tard, et normalisée sous le nom AASHTO-T283.

Aux Etats Unis, de nombreuses études utilisant cette procédure pour tester l'endommagement hivernal des enrobés bitumineux ont été menées à la fin du 20^{ème} siècle et au début du 21^{ème} siècle. Récemment, ce type de conditionnement est beaucoup utilisé par les chercheurs chinois. En France, des protocoles différents ont également été développés en se basant sur les conditions climatiques in-situ, pourtant aucun protocole n'est normalisé.

Le Tableau 4-5 présente des études appliquant la saturation de l'éprouvette dans l'eau suivie par des cycles GD. Deux méthodes de saturation sont généralement utilisées après immersion dans l'eau : sans ou avec saturation sous vides. Selon la littérature, la saturation sous vide est plus souvent appliquée du fait qu'on obtient un taux de saturation plus élevé dans une durée plus courte. Différentes amplitudes et durées sont considérées pour les cycles GD dont le nombre est également variable.

Tableau 4-5. Essais utilisant des cycles gel/dégel avec l'eau

Source	Conditionnement des éprouvettes			Paramètre étudié
	Cycles GD	Saturation (avant la sollicitation des cycles GD)	Durée	
Test original de Lottman (Lottman, 1978)	<p>Méthode 1 : Mettre les éprouvettes saturées dans un sac hermétique avec 10ml d'eau, puis gel à -18°C durant 15h, puis dégel pendant 24h dans un bain d'eau à 60°C. Ces procédures comptent pour 1 cycle GD</p> <p>Méthode 2 : Sollicitation de 18 cycles GD, gel pendant 4h à -18°C et dégel pendant 4h à 49°C (120°F).</p>	Saturation sous vide de 67 kPa pendant 30mins, puis suivie par l'immersion de 30mins dans l'eau aux conditions ambiantes	<p>-Méthode 1 : 40h (un cycle GD pendant 39h)</p> <p>-Méthode 2 : 140h (un cycle GD pendant 8h)</p>	Rapport entre les résistances à la traction indirecte des éprouvettes avant et après le conditionnement
Lottman modifié (AASHTO T283, 2014)	Avant d'utiliser la méthode 1 du test précédent, le mélange bitumineux foisonné est refroidi à 25°C pendant 2h, puis vieilli à 60°C pendant 24h, ensuite réchauffé à la température de fabrication pour le compactage des éprouvettes	Saturation sous vide à température ambiante jusqu'à 70%-80% de saturation des éprouvettes	~ 66h (un cycle GD pendant 39h)	
Tunncliff-Root Test (ASTM D4867, 2004)	Comme méthode 1 du test original de Lottman		~ 40h (un cycle GD pendant 39h)	

Freeze–Thaw Pedestal (tiré de (Solaimanian, et al., 2003))	L'enrobé chauffe à 150°C pendant 2h, puis refroidit à température ambiante, puis il est réchauffé à 150°C pour le compactage des éprouvettes. Eprouvettes immergées dans l'eau stockés dans une boîte verre hermétique, puis lancer des cycles GD ; gel à -12°C pendant 15h, dégel à 49°C pendant 9h	Immersion dans l'eau	Dépend du nombre des cycles GD appliqués (un cycle GD pendant 24h)	Nombre de cycles GD à créer la 1 ^{ère} fissure de l'échantillon avant et après le conditionnement
(Nadkarni, et al., 2009)	Appliquer la procédure selon AASHTO T283			Module complexe et résistance à la traction indirecte des enrobés avec et sans conditionnement
(Mauduit, et al., 2010)	Sollicitation des cycles GD consécutifs, gel à -10°C pendant 10h, dégel à 10°C pendant 10h. Vitesse de changement des températures 20°C/h	Saturation sous vide à deux différents niveaux 47 kPa et 86 kPa	7 jours au maximum (un cycle GD pendant 22h)	Quantification de l'expansion induits par cycles de GD des éprouvettes partiellement saturés d'eau
(Feng, et al., 2010)	Soumis à 0, 2, 4, 6, 8 cycles GD, gel à -20°C pendant 8h et dégel à 60°C pendant 4h	Saturation sous vide pendant 15mins	Dépend du nombre des cycles GD appliqués (un cycle GD pendant 12h)	Impact du sel et des cycles GD sur le comportement des EB en utilisant l'essai à la traction indirecte
(A. El-M. Behiry, 2012)	Conditionnement selon la procédure de AASHTO T283. Puis immersion des éprouvettes dans l'eau ou dans la saumure pendant 1, 3, 7, 14 jours.		Dépend du temps d'immersion des éprouvettes (15 jours au maximum)	Utilisation des tests Marshall (NF EN 12697-34, 2012) et la traction indirecte pour déterminer l'évolution de la résistance à l'humidité des EB selon la durée de conditionnement
(Jaskula, 2014)	Sollicitation de 1, 50 et 150 cycles GD. Gel à -18°C pendant 4h, dégel à 20°C pendant 2h dans l'eau. Puis immerger toutes éprouvettes dans un bain d'eau à 60°C pendant 24h.	Comme AASTHO T283	38.5 jours au maximum (un cycle GD pendant 6h)	Durée de vie des EB subis des conditionnement de GD

(Lamothe, 2014)	Sollicitation de 100 cycles consécutifs, gel -18°C pendant 11h30, dégel 10°C pendant 11h30, la vitesse de changement de température -56°C/h	Saturation sous vide de ≤4 kPa pendant 90mins	100 jours au maximum (un cycle GD pendant 24h)	Influence des cycles GD et de saumures sur le comportement de EB
(Lamothe, et al., 2015)	Saturation et sollicitation des cycles GD même que (Lamothe, 2014)			Quantification des contraction et expansion des éprouvettes partiellement saturés soumises à des cycles de GD
(Xu, et al., 2015)	Sollicitation de 30 cycles GD, gel sans eau à -18 °C pendant 16h, puis gel dans l'eau à -18°C pendant 16h ; dégel dans l'eau à 25°C pendant 12h	Saturation sous vide de 98 kPa pendant 15min	55 jours au maximum (un cycle GD pendant 44h)	Evolution interne des pores des EB soumis à des cycles GD par les rayons gammes et le méthode d'analyse d'image
(Lei, et al., 2016)	Sollicitation de 30 cycles GD, gel à -18°C pendant 16h en utilisant sac hermétique contenant 10ml d'eau, dégel dans l'air à 25°C pendant 8h	Même que (Xu, et al., 2015)	30 jours au maximum (un cycle GD pendant 24h)	Application de l'essai d'impact résonance pour évaluer la résistance à des cycles GD des EB.
(Ramirez Cardona, 2016)	1 cycle GD, gel à -18°C pendant 24h en utilisant le sac hermétique contenant 10ml d'eau, dégel dans l'air à 40°C pendant 30h	Immersion dans l'eau à 60°C pendant 7 jours	7.25 jours au maximum (un cycle GD pendant 54h)	Caractérisation thermomécanique des EB
(VU, 2017)	Sollicitation des cycles GD consécutifs, gel à -10°C pendant 10h, dégel à 10°C pendant 10h.	Saturation sous vide à 86 kPa pendant 3 heures	Dépend du nombre des cycles GD appliqués (un cycle GD pendant 20h)	Quantification la dilatation-contraction des EB au cours de gel/dégel

Selon la bibliographie, le rapport des résistances à la traction indirecte (TSR – Tensile Strength Ratio) calculé par l'équation (4-2) est considéré comme le critère le plus ancien et le plus utilisé pour évaluer l'endommagement de l'enrobé bitumineux :

$$TSR = \frac{S_{t-w}}{S_{t-d}} \quad (4-2)$$

avec S_{t-w} la résistance des éprouvettes conditionnées et S_{t-d} la résistance des éprouvettes non conditionnées.

Kiggundu & Roberts (Kiggundu & Roberts, 1988) ont réalisé une série de test TSR sur 26 enrobés bitumineux différents utilisés aux Etats-Unis. Ils ont trouvé que les matériaux utilisés ayant une valeur $TSR \geq 70\%$ sont relativement non-sensibles à l'humidité. La précision de cette méthode atteint 67% comparée avec l'observation in-situ. La valeur de TSR de 70% est

donc devenu le critère le plus appliqué jusqu'à aujourd'hui aux Etats-Unis. Beaucoup d'études sur la sensibilité à l'humidité des enrobés bitumineux ont été effectuées en se basant sur le conditionnement ASSTHO T283. Par exemple, Feng et al. (Feng, et al., 2010) a étudié l'impact des cycles GD sur 3 types de matériaux souvent utilisés en Chine : AC - « Dense-graded », AM - « Semi-open-graded », OGFC - « Open-graded » avec 6%, 12% et 18% respectivement de vides. Les éprouvettes cylindriques 101.6mm x 63.5mm (Hauteur x Diamètre) de type Marshall ont d'abord été saturées sous vide dans l'eau ou dans la saumure, puis testées (essai de traction indirecte (ITS – Indirect Tensile Strength test)) après 0, 2, 4, 6 et 8 cycles de GD (cf. Tableau 4-5). Les résultats obtenus sont présentés dans la Figure 4-8. Ils montrent que la teneur en vides a une grande influence sur la sensibilité aux cycles GD. Plus le matériau est poreux plus la dégradation est importante.

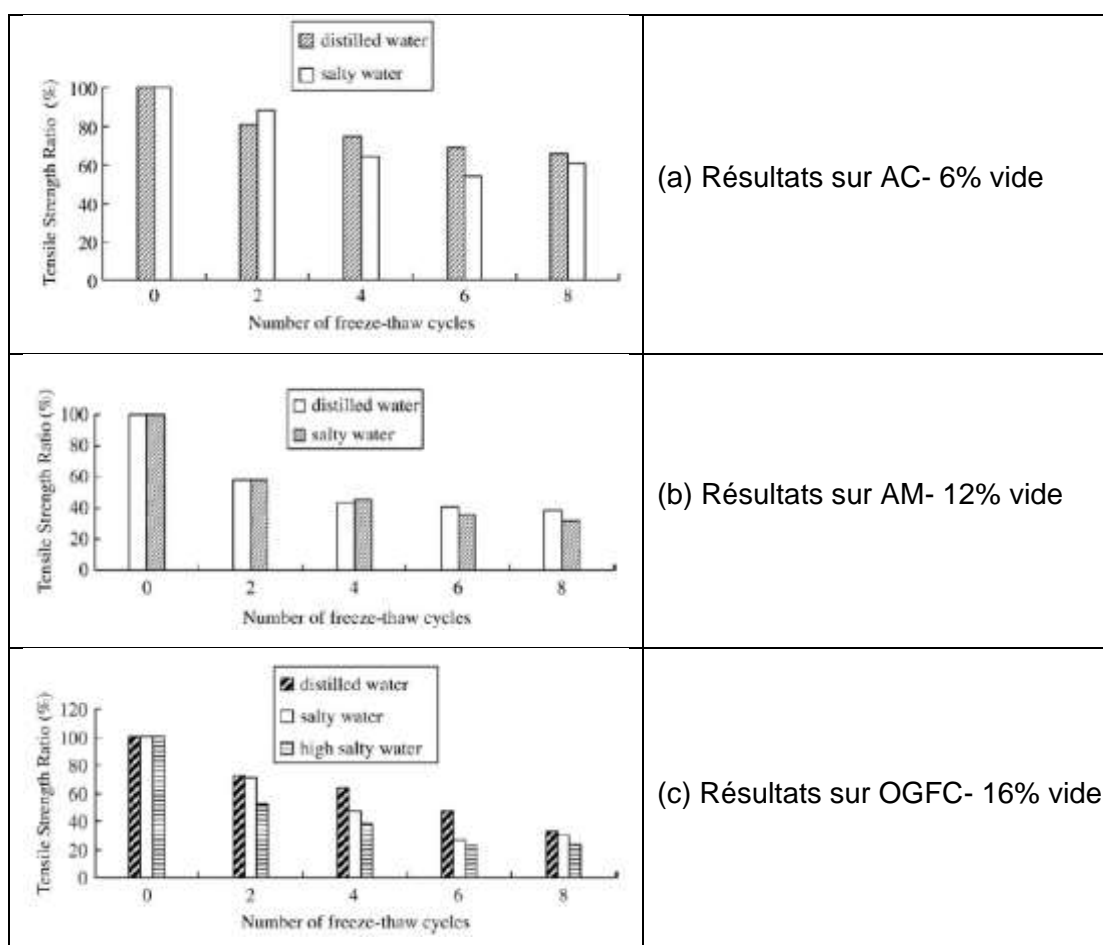


Figure 4-8. Résultats TSR sur enrobés saturés soumis à des cycles de gel/dégel, obtenus selon (Feng, et al., 2010)

Néanmoins, la valeur TSR ne fournit que la résistance à la rupture des enrobés bitumineux tandis que ses comportements VEL ou à la fatigue après des cycles gel/dégel sont encore très peu connus.

Lamothe et al. (Lamothe, 2014) (Lamothe, et al., 2017) a réalisé une série d'essais de module complexe (E^*) en traction-compression sur une éprouvette ayant 4.4% de vide soumise à des cycles GD comme présentés dans la partie précédente (Figure 4-5). Le bitume utilisé est de type PG 70-28 selon la norme MTQ 4101 utilisée au Québec. Le degré de saturation de l'éprouvette testée était contrôlé avant chaque essai E^* en s'assurant qu'il était toujours supérieur à 40%, sinon l'éprouvette était saturée sous-vide une nouvelle fois. Le test E^* a été effectué sur une plage de température de -35°C à 35°C et à des fréquences comprises entre 0.03Hz et 10Hz. Les résultats des essais E^* ont été analysés et modélisés à l'aide du modèle 2S2P1D développé par l'équipe de l'ENTPE (Olard & Di Benedetto, 2004) (Di Benedetto, et al., 2004) (cf. Figure 4-9 et Figure 4-11). Les variations des constantes du modèle ont été

utilisées pour quantifier les dégradations dues à des cycles GD. La Figure 4-10 montre les évolutions du module vitreux E_0 et du module statique E_{00} selon le nombre des cycles GD. Le module E_0 diminue et le module E_{00} augmente avec le nombre de cycles GD. Lamothe a introduit une variable caractérisant l'endommagement sur toute la gamme de fréquence et température définie par l'équation (4-3). La Figure 4-12 présente l'évolution de cette variable selon le nombre de cycles GD appliqué.

$$D_{X.GD} = 1 - \frac{|E^*|_{X.GD}}{|E^*|_{0.GD}} \quad (4-3)$$

Où $|E^*|_{X.GD}$ et $|E^*|_{0.GD}$ sont respectivement la norme de module complexe après X cycles GD et celle à même fréquence équivalente de la même éprouvette ayant subie 0 cycle GD.

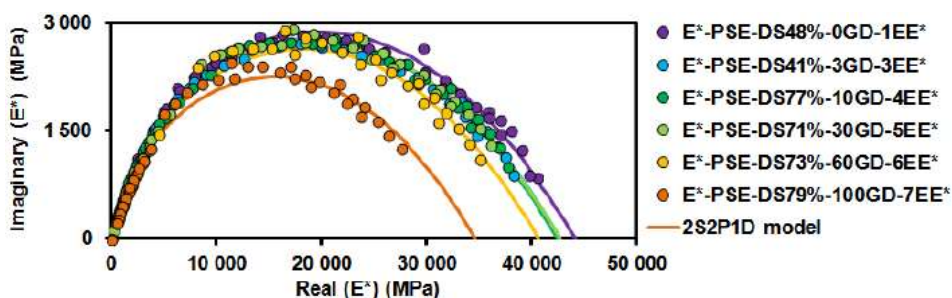


Figure 4-9. Modules complexes dans le plan Cole-Cole d'une éprouvette saturée dans l'eau (Lamothe, 2014)

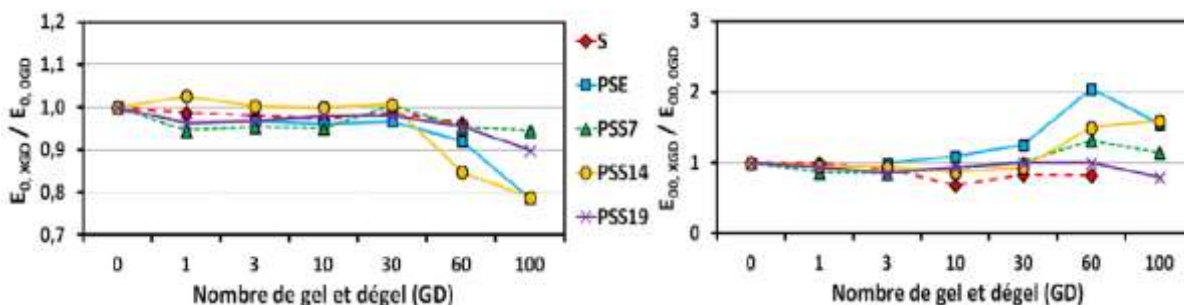


Figure 4-10. Évolutions du module vitreux E_0 et du module statique E_{00} des éprouvettes saturées selon le nombre de cycles GD subis (Lamothe, 2014)

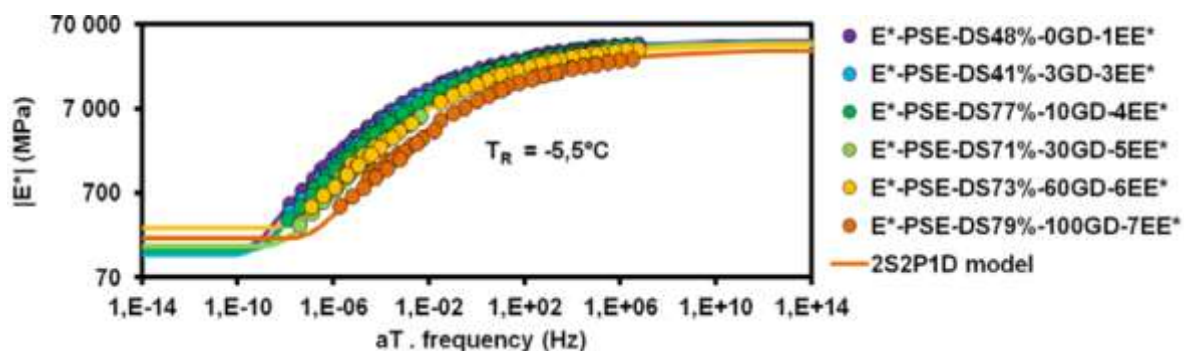


Figure 4-11. Courbes maîtresse de la norme du module complexe d'une éprouvette saturée dans l'eau en fonction des cycles de GD à la température de référence $T_R = -5.5^\circ\text{C}$ (Lamothe, 2014)

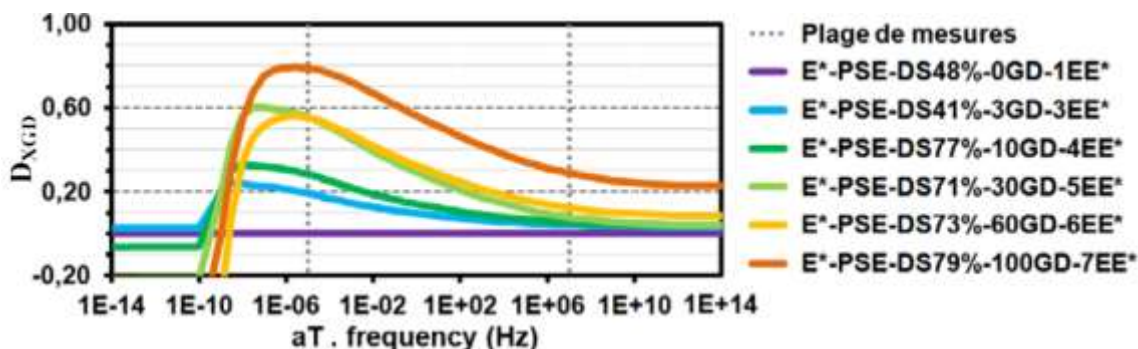


Figure 4-12. Évolution du dommage de l'éprouvette saturée dans l'eau en fonction des cycles de GD (D_{xGD}) calculé à la température de référence $T_R = -5.5^\circ\text{C}$ (Lamothe, 2014)

Après 100 cycles GD, la chute de la norme E^* peut atteindre 80% pour une température de test entre 20°C et 35°C . Les critères d'endommagement obtenus sont du même ordre de grandeur que ceux utilisant la méthode TSR. En fait, la comparaison entre les deux méthodes E^* et ITS a été réalisée par (Nadkarni, et al., 2009). Son équipe a effectué des essais ITS et de module complexe (E^*) sur des éprouvettes soumises au même conditionnement. Ces essais ont été réalisés à 25°C et aux fréquences suivantes : 25, 10, 5, 1, 0.5 et 0.1Hz. L'analyse des résultats obtenus indique qu'il n'y a pas de différence significative pour évaluer le niveau d'endommagement si l'on utilise le module complexe ou la résistance à la traction indirecte. Il a donc proposé de remplacer l'ITS par un essai E^* , qui a l'avantage de permettre de tester la même éprouvette avant et après le conditionnement.

D'autres recherches utilisent également des essais non-destructifs. Lei (Lei, et al., 2016) a utilisé des essais d'impact résonance (IRT – Impact Resonance Test) qui permettent de déterminer le module complexe par analyse inverse, pour caractériser la sensibilité hivernale des enrobés bitumineux. Des éprouvettes cylindriques de 100x20mm ou 100x40mm (Diamètre x Hauteur) possédant 4% de vide ont été fabriquées. Cinq matériaux, dénommés 70#, 90# ; 70-28, 90-28 et 90-60 ont été utilisés. Les matériaux 70# et 90# utilisent des bitumes purs correspondant aux bitumes semi-durs de type 50/70 et 70/100 respectivement, tandis que les matériaux 70-28, 90-28 et 90-60 utilisent des bitumes modifiés avec des poudrettes de caoutchouc de tailles différentes (correspondant à 0.7mm et 0.25mm environ). Les éprouvettes ont d'abord été soumises à des cycles GD (cf. Tableau 4-5). Les essais d'impact résonance ont été réalisés à 20°C , régulièrement après différents cycles de GD afin de suivre la dégradation des éprouvettes. Le rapport du module au cours des cycles $|E^*|_{con.}$ sur le module initial $|E^*|_{ini.}$ a été étudié. Il est dénommé « Dynamic Modulus Ratio », DMR et calculé par l'équation (4-4).

$$DMR = \frac{|E^*|_{con.}}{|E^*|_{ini.}} \quad (4-4)$$

La Figure 4-13 montre l'évolution de ce paramètre pour les matériaux testés. La norme du module complexe diminue progressivement avec le nombre de cycles GD. Après 30 cycles GD, le module des matériaux 70# et 90# chute d'environ 30% à 40%. Cette diminution est du même l'ordre que la dégradation observée par (Lamothe, 2014).

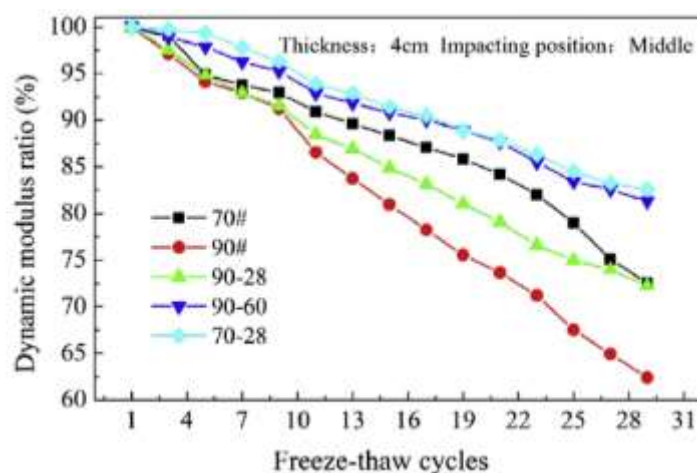


Figure 4-13. Résultats de l'essai IRT – Evolutions de la norme de module complexe (déterminé à 20°C) selon le nombre des cycles sollicités (Lei, et al., 2016)

D.A. Ramirez Cardona (Ramirez Cardona, 2016) a étudié l'influence des cycles GD sur le comportement viscoélastique (module complexe et coefficient de Poisson) et à la fatigue d'enrobés bitumineux. Les matériaux, destinés à être utilisés dans les infrastructures de voie ferrée, étaient de type GB3 et GB4 à base d'un bitume 35/50, avec des teneurs en vide respectives de 8% pour GB3 et 4.5% pour GB4. Des éprouvettes de forme cylindrique de 75x140mm (Diamètre x Hauteur) ont été fabriquées. Elles ont été divisées en deux lot : un lot sec et l'autre conditionné selon le protocole, qui se compose de 3 étapes (cf. Tableau 4-5).

Les résultats obtenus montrent que le conditionnement utilisé ne modifie pas significativement le comportement VEL. Cela vient peut-être du fait que le conditionnement utilisé cause les faibles degrés de saturation des éprouvettes (environ 50% pour GB3 et 27% pour GB4) (Ramirez Cardona, et al., 2017). Cependant, il a une grande influence sur le comportement à la fatigue des matériaux. Les Figure 4-14 et Figure 4-15 présentent les courbes de Wöhler des résultats d'essais de fatigue en traction-compression, qui ont été réalisés à 10°C avec une sollicitation sinusoïdale en déformation aux amplitudes différentes de 60, 70, 90 et 110 $\mu\text{m}/\text{m}$ et une fréquence 10Hz. Selon les résultats obtenus (Figure 4-16), la durée de vie des éprouvettes conditionnées du type GB3 diminue fortement par rapport à celle des éprouvettes non-conditionnées. Ces dégradations sont vraiment remarquables et il faut en tenir compte dans le dimensionnement des structures routières (Ramirez Cardona, 2016). Cependant, l'influence de l'humidité sur les éprouvettes GB4 semble non-significatif. Cela peut venir du fait que le pourcentage de vide des éprouvettes GB4 testés est près de la moitié de celui des éprouvettes GB3. En plus, les résultats des éprouvettes GB4 sont plus dispersés que ceux des éprouvettes GB3. Il y a des éprouvettes très sensibles au conditionnement utilisé (Figure 4-17) tandis que les autres sont moins influencées. Il faut donc plus de résultats pour mieux comprendre ce phénomène.

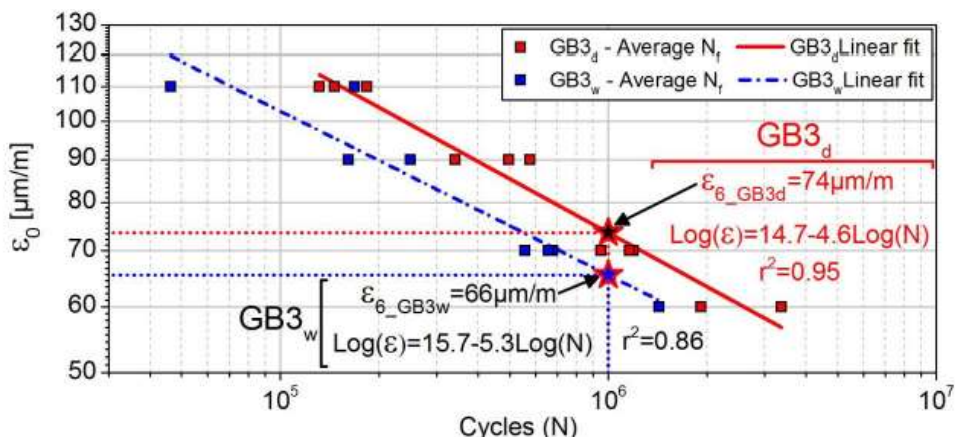


Figure 4-14 Courbes de Wöhler de fatigue de l'enrobé bitumineux GB3 (courbe discontinue- éprouvette conditionnée) (courbe continue - éprouvette non-conditionnée) (Ramirez Cardona, 2016)

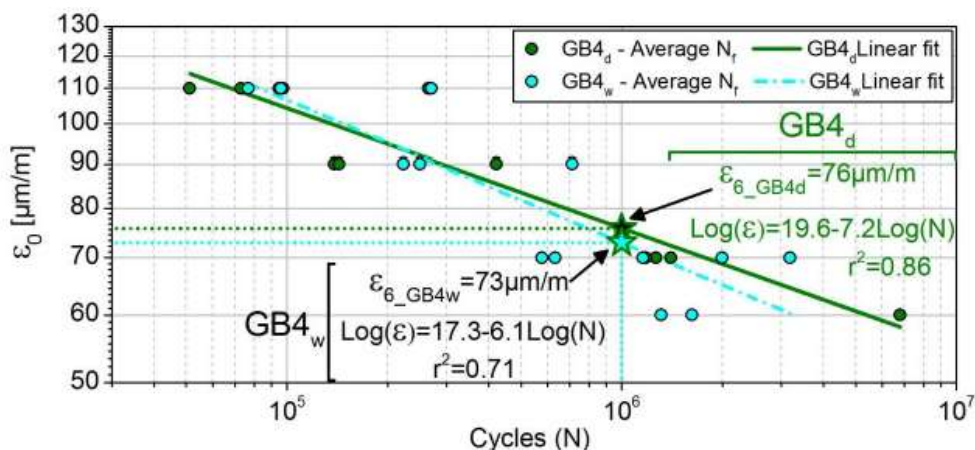


Figure 4-15. Courbes de Wöhler de fatigue de l'enrobé bitumineux GB3 (courbe discontinue- éprouvette conditionnée) (courbe continue - éprouvette non-conditionnée) (Ramirez Cardona, 2016)

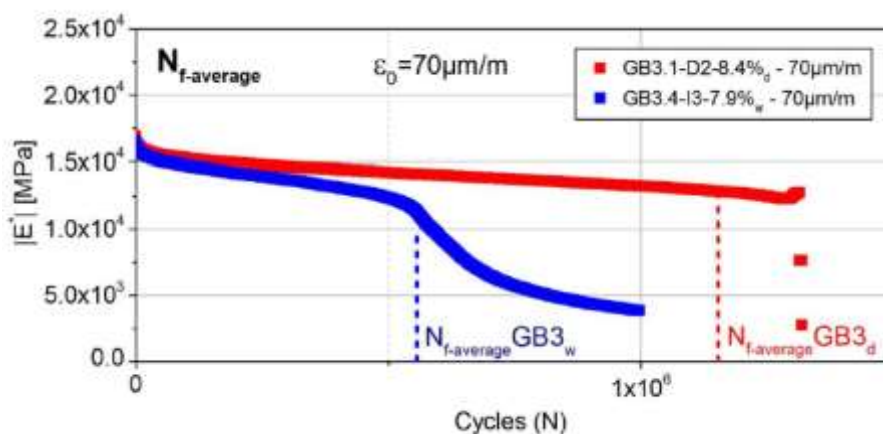


Figure 4-16. Evolution de la norme du module complexe $|E^*|$ en fonction du nombre de cycles appliqués N , lors d'essais de fatigue sur enrobé de type GB3 (courbe bleu- éprouvette conditionnée) (courbe rouge - éprouvette non-conditionnée) (Ramirez Cardona, 2016)

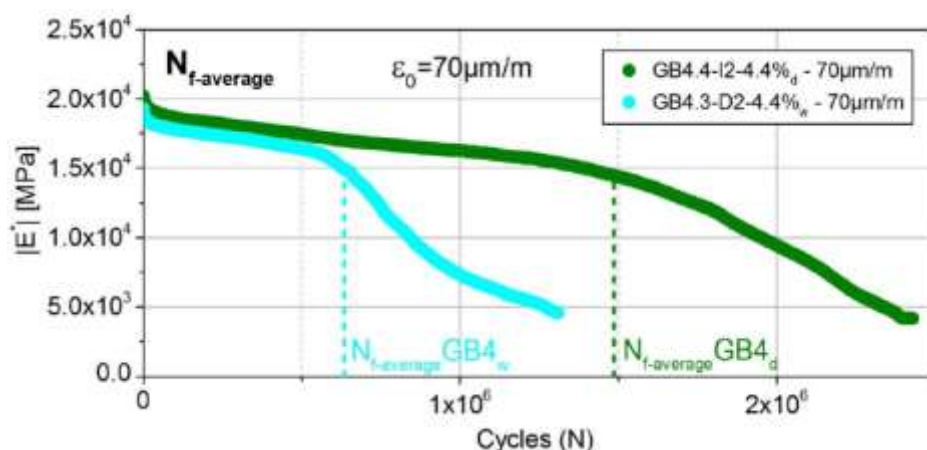


Figure 4-17. Evolution de la norme du module complexe $|E^*|$ en fonction du nombre de cycles appliqués N , lors d'essais de fatigue sur enrobé de type GB4 (courbe cyan- éprouvette conditionnée) (courbe verte - éprouvette non-conditionnée) (Ramirez Cardona, 2016)

D'autres travaux ont étudié le comportement des enrobés bitumineux durant les cycles GD et notamment les phénomènes de « gonflement ». Maudit (Maudit, et al., 2010) a étudié un enrobé bitumineux classique EB 0/10 ayant environ 9% de vides. Trois éprouvettes cylindriques de 80x90mm (Diamètre x Hauteur) ont été saturées sous vide, pour atteindre trois degrés de saturation: 0%, 29% et 51%. Elles ont ensuite été soumises à une sollicitation thermique de gel/dégel (cf. Tableau 4-5) à une extrémité tandis que l'autre extrémité reste libre. L'évolution de la température à des points différents de l'éprouvettes (Figure 4-18) ainsi que sa contraction/expansion (Figure 4-19) ont été suivies au cours des cycles GD.

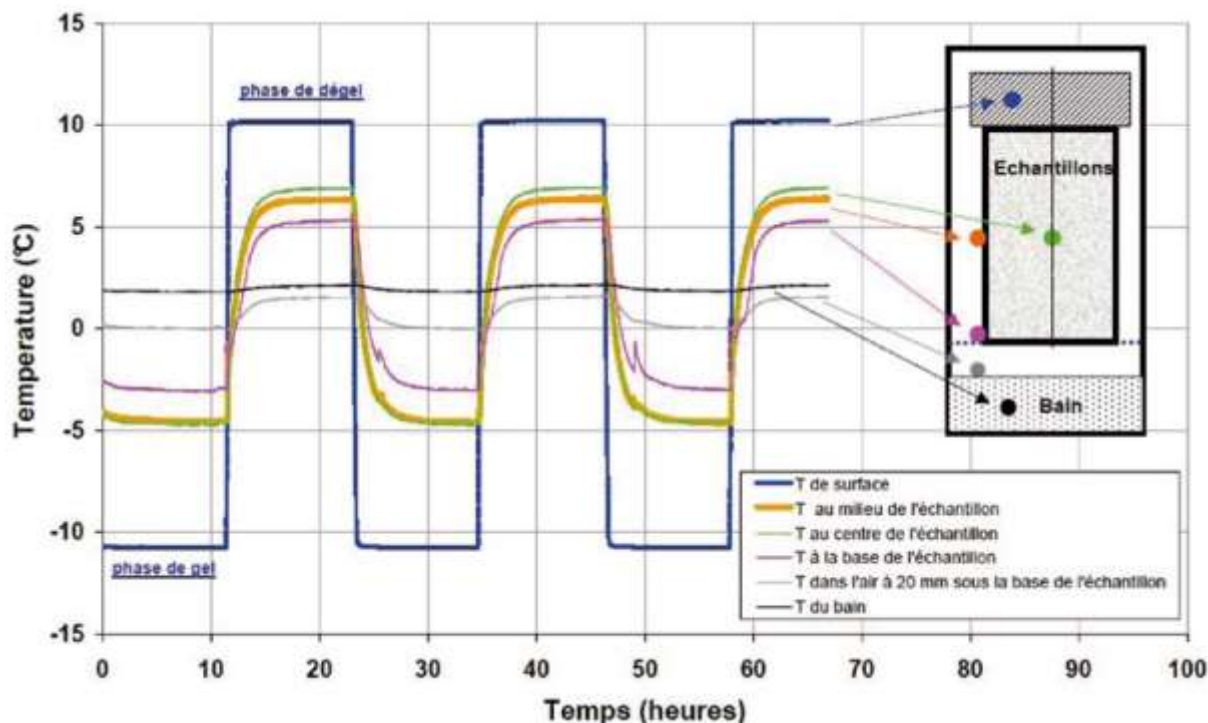


Figure 4-18. Evolution de température à différents points de l'éprouvettes au cours des cycles GD (Maudit, et al., 2010)

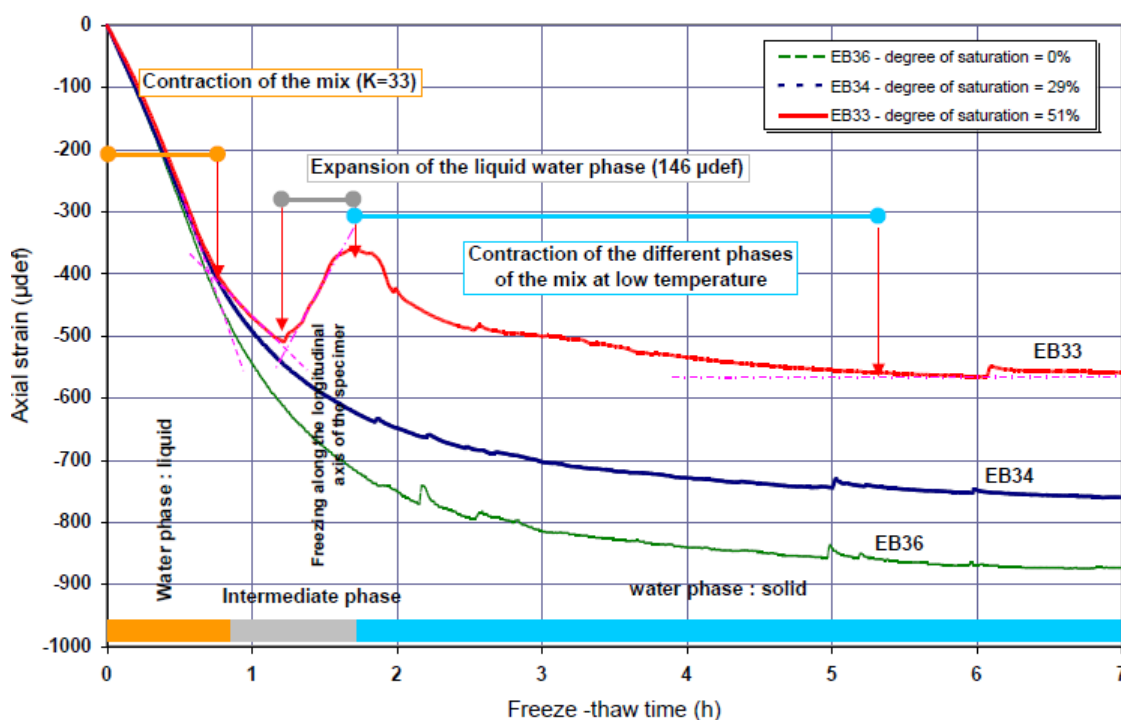


Figure 4-19. Evolution de déformation axiale des éprouvettes en phase de gel du premier cycle thermique (Mauduit, et al., 2010)

La vitesse de propagation de la glace a également été déterminée à partir des mesures d'expansion de l'enrobé (combinant contraction thermique et expansion lié au développement de la glace) et du calcul de la contraction thermique de l'enrobé bitumineux. Les résultats montrent que la saturation diminue la contraction des éprouvettes lors des cycles GD en raison de l'expansion de l'eau se transformant en glace. La même observation a été également obtenue par (Lamothe, et al., 2015). Dans le cas d'une structure multicouche, ce phénomène génère des contraintes internes qui peuvent décoller les matériaux au niveau de leurs interfaces et diminuer évidemment la durabilité des chaussées (Mauduit, et al., 2010).

4.2.3.4 Oxydation due au vieillissement des matériaux

La majorité des études concernent des matériaux, non vieillis, qui sont représentatifs d'une chaussée neuve. Néanmoins, certaines études comprennent des périodes de vieillissement dans leurs procédures de conditionnement. Le vieillissement artificiel est réalisé sur des matériaux foisonnés ou compactés. Le moyen le plus courant d'accélérer le vieillissement des bitumes matériaux est de les soumettre à une température élevée pendant une période. En pratique, on distingue deux types de vieillissement :

1. Vieillissement à court terme: il se produit pendant des phases du chauffage, du mélange et de la pose des mélanges bitumineux lors de la construction d'une structure de chaussée.
2. Vieillissement à long terme: il se produit pendant la durée de vie des matériaux de chaussée. Il est ensuite influencé par les conditions en service de la structure.

Pour les bitumes, deux procédures de vieillissement existent, la méthode « Rolling Thin-Film Oven Test » - RTFOT (AASHTO T240, 2013) et la méthode « Pressurized Aging Vessel » - PAV (AASHTO R28, 2012) qui correspondent respectivement au vieillissement à court terme et celui à long terme du bitume.

- ▶ L'essai RTFOT est utilisé pour simuler le vieillissement à court terme, sous l'effet de la température et de l'air sur un film de liant bitumineux en mouvement. Ce film bitumineux est chauffé dans un four pendant 85mins à 163°C, puis refroidi sur une grille pendant

60-180mins. Les effets de ce traitement sont déterminés par la mesure des propriétés du liant bitumineux avant et après l'essai tels que la viscosité à 60°C et la ductilité à 15°C du bitume.

- ▶ L'essai PAV a pour but de simuler l'oxydation du bitume pour un service de 5 à 10 ans des enrobés bitumineux sur le terrain. La procédure PAV est basée sur le principe de superposition temps-température pour accélérer le vieillissement du bitume à travers l'exposition à de hautes températures et des conditions de pression sévères. Les échantillons sont conditionnés d'abord selon le test RTFO, ensuite soumises à la température d'oxydation pendant 20 heures dans un récipient sous une pression de 2.1 MPa.

Pour les enrobés, des procédures différentes de vieillissement sont également développées. Le Tableau 4-6 et Tableau 4-7 résument les procédures de vieillissement sur les matériaux compactés et celles sur les matériaux foisonnés selon (Kim, et al., 2013) (Dony & Ziyani, 2016).

Tableau 4-6. Procédures de vieillissement pour les éprouvettes compactées

Document	Procédures de vieillissement		Equipement
	Température	Durée totale	
(Hveem et al., 1963)	60 °C	1000 h	Dans un four
(Mugler, 1970)	163°C	5 h	
(Tia et al., 1988)	60°C	90 jours	
(Von Quintus et al., 1992)	2 jours à 60°C + 5 jours à 107°C	7 jours	
(AASHTO R30, 2002)	85°C	5 jours	
(Hayicha et al., 2003)	60°C	20 jours	
(Martin et al., 2003)	3 jours à 70°C + 4 jours à 80°C	7 jours	
(Collop et al., 2004)	85°C	65 h	Dans un four , éprouvette saturée et soumis à la pression 2.1 MPa
TRL (Nicholls, 2006)	60°C	48 h	Dans un four
(Van den Bergh, 2011)	110-120°C	16 h	

Tableau 4-7. Procédures de vieillissement pour les mélanges bitumineux

Document	Vieillissement à court terme		Vieillissement à long terme		Equipement
	Température	Durée	Température	Durée	
LCPC (Such et al., 1997)	135°C	4 h	100°C	24 h	Dans un four
Shell (Read and Whiteoak, 2003)	Non spécifié	2 h	80°C	7 jours	
BRRC (Piérard & Vanelstraete, 2009)	135°C	1.5 h	60°C	14 jours	
RILEM (De la Roche et al., 2009)	135°C	4 h	85°C	7-9 jours	
PAV (Mollenhauer & Mouillet, 2011)	135°C	4 h	90°C	20 h	Dans un récipient contrôlant la pression
(Van den Bergh, 2011)	135°C	4h	85°C	7 jours	Dans un four
Méthode UV	Comme BRRC		Comme BRRC + l'oxydation sous les rayons Ultraviolet (UV) + chauffage à 60°C		Dans un four

Parmi ces méthodes, la procédure de RILEM est la plus appliquée dans les recherches récentes en raison de sa bonne corrélation avec les résultats sur le terrain. Selon (De la Roche et al., 2009), cette procédure simule un vieillissement de plus 10 ans des enrobés bitumineux in-situ.

Baek (Baek, et al., 2012) a testé l'influence de vieillissement sur le comportement VEL des enrobés bitumineux à 4 niveaux différents : STA (Short-term aging) vieillissement du mélange à 135°C pendant 4heures, LTA1 (Long-term aging level 1) vieillissement des éprouvettes compactées à 85°C pendant 2 jours après STA, LTA2 (Long-term aging level 2) vieillissement des éprouvettes compactées à 85°C pendant 4 jours après STA, LTA3 (Long-term aging level 3) vieillissement des éprouvettes compactées à 85°C pendant 8 jours après STA. Des éprouvettes de forme cylindrique 75x140mm (Diamètre x Hauteur) avec une teneur en vide entre 3.5% et 4.5% ont été utilisées pour réaliser des essais de module complexe E^* en traction-compression. Ces essais ont été réalisés à des fréquences de 25, 10, 5, 1, 0.5, et 0.1 Hz et à des températures de -10, 5, 20, 40 et 54°C (AASHTO T342, 2014). Les Figure 4-20 et Figure 4-21 présentent les courbes maîtresses de E^* mesuré. Ces résultats montrent l'effet du vieillissement, qui rigidifie les enrobés pour une température et une fréquence donnée.

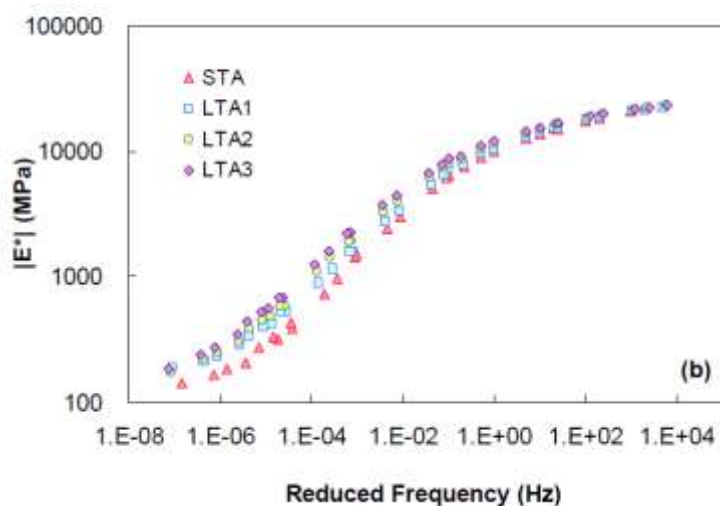


Figure 4-20. Courbes maîtresses de la norme du module complexe à la température de référence $T_R=5^\circ\text{C}$ (Baek, et al., 2012)

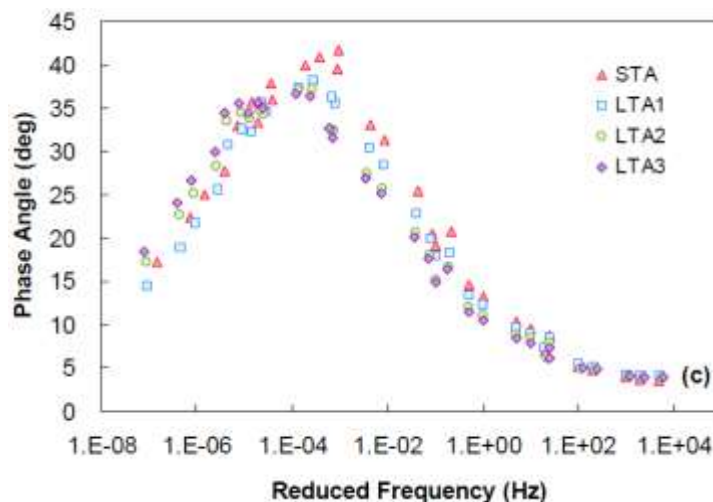


Figure 4-21. Courbes maîtresses de l'angle de phase à la température de référence $T_R=5^\circ\text{C}$ (Baek, et al., 2012)

Yang (Yang, et al., 2016) a étudié l'effet combiné du vieillissement et des cycles GD sur le module complexe d'enrobé, à une teneur en vide de 4%. Les essais E^* ont été réalisés selon

la norme (AASHTO T342, 2014) avec des éprouvettes cylindriques de 100x150mm (Diamètre x Hauteur). Trois niveaux de vieillissement du matériau ont été étudiés : (HMA_2hr) vieillissement à court terme du mélange foisonné à température compactée pendant 2 heures, (HMA_4hr) vieillissement à court terme du mélange foisonné à 135°C pendant 4 heures, (HMA_5days) vieillissement à 85°C pendant 5 jours de l'éprouvette compactée qui était fabriquée après (HMA_4hr). Des éprouvettes en matériaux vieillis ont également subi des cycles GD, en étant conditionnées selon la norme (AASHTO T283, 2014). La comparaison de la norme du module complexe de deux lots éprouvettes, conditionnées et non-conditionnées a été réalisée (Figure 4-23). La combinaison des deux effets, vieillissement et cycle GD, a tendance à diminuer la rigidité du matériau (contrairement au seul effet du vieillissement).

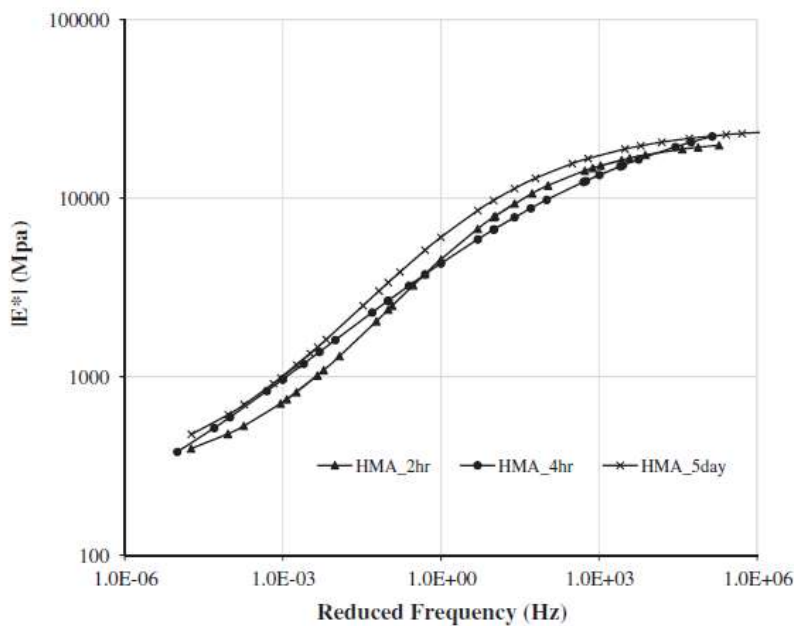


Figure 4-22. Courbes maîtresses de la norme du module complexe à la température de référence $T_R=21.1^\circ$ (Yang, et al., 2016)

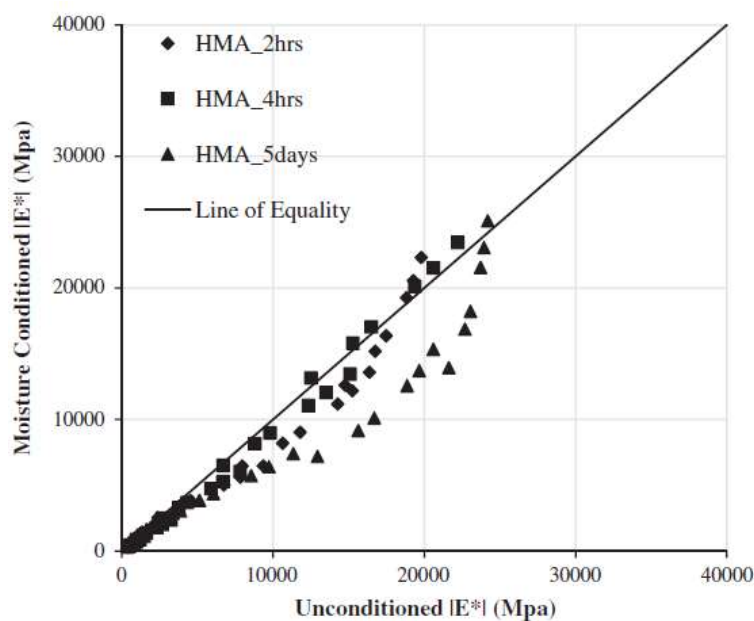


Figure 4-23. Comparaison des résultats E^* des éprouvettes conditionnées selon (AASHTO T283, 2014) et celles non-conditionnées (Yang, et al., 2016)

5 Conclusion

Une étude bibliographique des protocoles de conditionnement et des méthodes d'essais pour l'évaluation de la sensibilité hivernale et le vieillissement des enrobés bitumineux a été réalisée.

Les méthodes de conditionnement pour tester la sensibilité hivernale peuvent être regroupées en 3 catégories : conditionnement uniquement avec l'eau, conditionnement avec des cycles de gel/dégel (GD) sans eau et conditionnement avec des cycles GD avec l'eau. Selon la littérature, la présence d'eau cause forcément une perte de la résistance des enrobés bitumineux. La saturation des éprouvettes sous vide ou dans l'eau à une température élevée sont les méthodes les plus appliquées pour les recherches sur l'étude de la sensibilité à l'humidité des enrobés bitumineux. En outre, la méthode de saturation sous vide semble une méthode permettant d'accélérer l'endommagement causé par des cycles GD par rapport à la méthode d'immersion statique des éprouvettes dans l'eau. Les cycles GD sans eau causent de très faibles dégradations qui semblent non-significatives par rapport aux endommagements créés par les cycles GD avec l'eau. La sollicitation des cycles GD sur les éprouvettes saturées sous vide est donc recommandée pour l'étude de la sensibilité hivernale.

Selon la littérature, la saturation des éprouvettes sans cycle GD et les cycles GD sans eau n'ont qu'une très faible influence sur le comportement VEL des enrobés bitumineux. Lorsque ces deux conditionnements (eau et cycles de GD) sont combinés, une diminution du module complexe et une diminution de la résistance à la fatigue ont été observées et quantifiées pour des conditionnements différents. L'effet sur l'expansion/contraction des matériaux a également fait l'objet d'études particulières mais aucun résultat ne concerne le comportement à basse température des enrobés bitumineux après ce type de conditionnement (eau et cycles GD).

L'effet du vieillissement sur les matériaux bitumineux a été largement étudié. Par contre, il n'existe que peu d'études combinant les effets du vieillissement et de l'eau. Une étude montre une chute de la rigidité de l'enrobé bitumineux si on combine ces deux effets. L'étude envisagée dans les travaux de thèses relatifs au thème 1.5 du PN DVDC, permettra une meilleure connaissance de l'influence des cycles GD sur le comportement des matériaux vieillis, et d'envisager une meilleure corrélation avec les sollicitations in-situ. Compte tenu des résultats obtenus dans la littérature, l'effet de l'introduction de saumure qui n'agit que sur la diminution de la température de congélation, ne sera pas un paramètre de l'étude.

Concernant le comportement des matériaux, il convient de distinguer les différents essais réalisés. La plupart des essais utilisent des matériaux compactés et quelques-uns des matériaux foisonnés. La démarche utilisée pour quantifier les dégradations induites par l'eau et/ou les cycles GD consiste à comparer les propriétés mécaniques des matériaux « conditionnés » à ceux « non-conditionnés ». Les propriétés évaluées sont principalement la perte de résistance ou la baisse de rigidité du matériau dues à l'endommagement causé par les procédures de conditionnement.

Pour l'évaluation des différentes propriétés, il convient de séparer deux types d'essais : les essais destructifs (compression, stabilité, résistance à la traction indirecte et fatigue) et les essais non-destructifs (module complexe, propagation d'ondes). Ces derniers permettent de suivre l'évolution des propriétés du matériau sur une même éprouvette au cours de son vieillissement.

Les travaux de thèse intégreront des essais mécaniques non destructifs ainsi que des essais destructifs. Des modélisations seront également effectuées. Les résultats obtenus visent d'abord la quantification de l'endommagement hivernal des enrobés bitumineux soumis à des cycles GD. Les applications pratiques devraient permettre d'évaluer l'état des matériaux en se basant sur les paramètres étudiés afin de prévenir des travaux de maintenance pour les revêtements bitumineux.

6 Références

- A. El-M. Behiry, A. (2012). Laboratory Evaluation of Resistance to Moisture Damage in Asphalt Mixtures. *Ain Shams Engineering Journal*, 4, 351-363.
- AASHTO T283. (2014). Standard Method of Test for Resistance of Compacted Asphalt Mixtures to Moisture-Induced Damage. *American Association of State Highway and Transportation Officials*.
- AASHTO R28. (2012). Accelerated Aging of Asphalt Binder Using a Pressurized Aging Vessel (PAV). *American Association of State Highway and Transportation Officials*.
- AASHTO R30. (2002). Standard Practice for: Mixture Conditioning of Hot Mix Asphalt (HMA). *American Association of State Highway and Transportation Officials*.
- AASHTO T165. (2002). Standard Test Method for Effect of Water on Compressive Strength of Compacted Bituminous Mixtures. *American Association State Highway and Transportation Officials Standard*.
- AASHTO T240. (2013). Effect of Heat and Air on a Moving Film of Asphalt Binder (Rolling Thin-Film Oven Test). *American Association of State Highway and Transportation Officials*.
- AASHTO T324. (2014). Standard Method of Test for: Hamburg Wheel-Track Testing of Compacted Hot Mix Asphalt (HMA). *American Association of State Highway and Transportation Officials*.
- AASHTO T342. (2014). Method of Test for Determining Dynamic Modulus of Hot Mix Asphalt (HMA). *American Association of State Highway and Transportation Officials*.
- Applied Research Associates (ARA). (2004). Guide for Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures. *National Cooperative Highway Research Program*, USA.
- ASTM D4867. (2004). Standard Test Method for Effect of Moisture on Asphalt Concrete Paving Mixtures. *ASTM International*.
- AIPCR. (2012). Prendre en compte les effets du changement climatique sur les chaussées routières. *AIPCR – Association mondiale de la Route*, 2012R06FR, 16-22.
- Baek, C., Underwood, B., & Kim, Y. (2012). Effects of Oxidative Aging on Asphalt Mixture Properties. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* (2296), 77-85.
- Bagampadde, U., Isacson, U., & M. Kiggundu, B. (2004). Classical and Contemporary Aspects of Stripping in Bituminous Mixe. *Road Materials and Pavement Design*, 5(1), 7-43.
- Bell, C., Fellin, M., & Wieder, A. (1994). SHRP A390 - Laboratory Aging of Asphalt-Aggregate Mixtures: Field Validation. *National Research Council: Strategic Highway Research Program*, USA.
- California Test 307. (2000). Method of Test for Moisture Vapor Susceptibility of Bituminous Mixtures. *Department of Transportation California*.
- Caro S., S. (2009). A Coupled Micromechanical Model of Moisture-induced Damage in Asphalt Mixtures: Formulation and Applications. *PhD Thesis, Texas A&M University, USA*.
- Castaneda Pinzon, E. (2004). Contribution de méthodes non destructives à l'évaluation de l'effet de l'eau sur les enrobés bitumineux. *PhD Thesis, l'Université de Nantes, France*.
- Corté, J. F., & Garnier, P. (2010). Rapport de la mission sur les dégâts occasionnés sur le réseau routier national durant l'hiver 2009-2010. *Conseil Général de l'Environnement et du Développement durable*, 007210(01).

- Corté, J., & Di Benedetto, H. (2005). Matériaux Routiers Bitumineux I. *Hermès Lavoisier éditions*, Paris, Volume I.
- Das, P. (2014). Ageing of Asphalt Mixtures: Micro-scale and Mixture Morphology. *PhD Thesis, KTH Royal Institute of Technology*, Sweden.
- Di Benedetto, H., & Corté, J. (2005). Matériaux Routiers Bitumineux II. *Hermès Lavoisier éditions*, Paris, Volume II.
- Di Benedetto, H., Olard, F., Sauzéat, C., & Delaporte, B. (2004). Linear Viscoelastic Behaviour of Bituminous Materials: From binders to mixes. *Road Materials and Pavement Design*, 5:sup1, 163-202.
- Dony, A., & Ziyani, L. (2016). Etat de l'art sur les procédés de vieillissement accéléré en laboratoire et sur les caractéristiques des agrégats d'enrobés sur les chantiers français - Thème de rattachement : S01 - Procédés de vieillissement. *Projet National MURE – Projet ANR IMPROVMURE - Multi-Recyclage et Enrobés tièdes*, France.
- Doré, G., Konrad, J., & Roy, M. (1997). Role of Deicing Salt in Pavement Deterioration by Frost Action. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* (1596), 70-75.
- Feng, D., Yi, J., Wang, D., & Chen, L. (2010). Impact of Salt and Freeze–Thaw Cycles on Performance of Asphalt Mixtures in Coastal. *Cold Regions Science and Technology*, 62(1), 34-41.
- Hammoum, F. (2015). Présentation au séminaire sur l'Adaptation des infrastructures et des réseaux de transport au changement climatique: *Adaptation des Infrastructures aux évolutions des conditions climatiques*. Champs-sur-Marne: DGITM-AIPCR, Cerema.
- Hicks, R., Santucci, L., & Aschenbrener, T. (2003). Introduction and Seminar Objectives - Moisture Sensitivity of Asphalt Pavements: A National Seminar. *Transportation Research Board - TRB*, San Diego, California, USA, 3-35.
- Jaskula, P. (2014). The Effect of Water and Frost on Fatigue Life of Asphalt Concrete. Conference Paper: *Advanced Characterization of Asphalt and Concrete Materials*, Gdansk University of Technology, Poland.
- Jaskula, P., & Judycki, J. (2008). Verification of the Criteria for Evaluation of Water and Frost Resistance of Asphalt Concrete. *Road Materials and Pavement Design*, 9(sup1), 135-162.
- Joly, D., Brossard, T., Cardot, H., Cavailhes, J., Hilal, M., & Wavresky, P. (2010). Les Types de Climats en France, Une Construction Spatiale. *Cybergeog: European Journal of Geography*.
- Kakar, M., Hamzah, M., & Valentin, J. (2015). A Review on Moisture Damages of Hot and Warm Mix Asphalt and Related Investigations. *Journal of Cleaner Production*, 99, 39-58.
- Kiggundu, B. M., & Roberts, F. L. (1988). Stripping in HMA Mixtures: State-of-the-Art and Critical Review of Test Methods. *National Center for Asphalt Technology: NCAT Report No. 88-2*, USA.
- Kim, Y., Hintz, C., Rad, F., Elwardany, M., Underwood, S., Farrar, M., & Glaser, R. (2013). Project NCHRP 09-54: Long-Term Aging of Asphalt Mixtures for Performance Testing and Prediction. *National Cooperative Highway Research Program (NCHRP)*, USA.
- Lamothe, S. (2014). Endommagement d'un enrobe bitumineux partiellement saturé en eau ou en saumure soumis à des sollicitations cycliques de gel-dégel et mécaniques. *PhD Thesis, Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat (ENTPE)- Université de Lyon*, France.

- Lamothe, S., Peratton, D., & Di Benedetto, H. (2015). Contraction and Expansion of Partially Saturated Hot Mix Asphalt Samples. *Road Materials and Pavement Design*, 16(2), 277-299.
- Lamothe, S., Perraton, D., & Di Benedetto, H. (2017). Degradation of Hot Mix Asphalt Samples Subjected to Freeze-Thaw Cycles and Partially Saturated with Water or Brine. *Road Materials and Pavement Design*, 18(4), 849-864.
- Lau, C., Lunsford, K., Glover, C., & R. R. Davison. (1992). Reaction Rate and Hardening Susceptibilities as Determined from Pressure Oxygen Vessel Aging of Asphalt. *Transportation Research Record* (1342), 50-75.
- Lei, Z., Tian-shuai, L., & Yi-qiu, T. (2016). The Potential of Using Impact Resonance Test Method Evaluating the Anti-freeze-thaw Performance of Asphalt Mixture. *Construction and Building Materials*, 115, 54-61.
- Lottman, R. P. (1978). NCHRP Report 192: Predicting Moisture-Induced Damage to Asphaltic Concrete. Transportation Research Board (TBR), *National Research Council*, Washington, D.C., USA.
- Mauduit, C., Hammoun, F., Piau, J., Mauduit, V., Ludwig, S., & Hamon, D. (2010). Quantifying Expansion Effects induced by Freeze-Thaw cycles in Partially Water Saturated Bituminous Mix: Laboratory Experiments. *Road Materials and Pavement Design*, 11(Sup1), 443-457.
- Mauduit, V., Maudit, C., Vulcano-Greullet, N., & Coulon, N. (2007). Dégradations précoces des couches de roulement bitumineuses à la sortie des hivers. *RGRA-Revue Generale des Routes et des Aerodromes*, 859, 99-104.
- Mauduit, V., Maudit, C., Vulcano G., N., Coulon, N., Hammoum, F., David, H., . . . Chabot, A. (2013). Dégradation subite des enrobés bitumineux par période de gel/dégel: analyse de cas de terrain et recherche exploratoire en laboratoire. *Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées LPC, France* (279), 47-63.
- Mehrara, A., & Khodaii, A. (2013). A Review of State of the Art on Stripping Phenomenon in Asphalt Concrete. *Construction and Building Materials*, 38, 423-442.
- Mercado, E. (2007). Influence of Fundamental Material Properties and Air Void Structure on Moisture Damage of Asphalt Mixes. *PhD Thesis, Texas A&M University, USA*.
- Mouillet, V., Ginoux, M., Piérard, N., Mollenhauer, K., Gabet, T., Mirski, K., & Kemperle, E. (2011). Re-road – End of Life Strategies of Asphalt Pavements: Test Procedures - Methodologies for Reclaimed Asphalt Binder. *European Commission DG Research*.
- N. Kingros. (2008). Modeling of Combined Physical-Mechanical Moisture Induced Damage in Asphaltic Mixes. *PhD Thesis, Delft University, Netherlands*.
- N. Partl, M., Prot, L., Di Benedetto, H., Canestrari, F., Marsac, P., Tebaldi, G., & (Eds). (2018). Testing and Characterization of Sustainable Innovative Bituminous Materials and Systems: State-of-the-Art Report of the RILEM Technical Committee 237-SIB. *Springer Science & Business Media*, Volume 24.
- Nadkarni, A., Kaloush, K., Zeiada, W., & Biligiri, K. P. (2009). Using Dynamic Modulus Test to Evaluate Moisture Susceptibility of Asphalt Mixtures. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* (2127), 29-35.
- NF EN 12697-12. (2008). Mélanges bitumineux - Méthodes d'essai pour mélange hydrocarboné à chaud - Partie 12 : Détermination de la sensibilité à l'eau des éprouvettes bitumineuses. *Association Française de Normalisation - AFNOR*.
- NF EN 12697-33. (2007). Mélanges bitumineux - Méthodes d'essai pour mélange hydrocarboné à chaud - Partie 33: Confection d'éprouvettes au compacteur de plaque. *Association Française de Normalisation - AFNOR*.

- NF EN 12697-34. (2012). Mélanges bitumineux - Méthodes d'essai pour mélange hydrocarboné à chaud - Partie 34 : Essai Marshall. *Association Française de Normalisation - AFNOR*.
- NF EN 13108-1. (2007). Mélanges bitumineux - Spécifications des matériaux - Partie 1: Enrobés bitumineux. *Association Française de Normalisation - AFNOR*.
- Olard, F. (2003). Comportement thermomécanique des enrobés bitumineux à basses températures. (Thèse, Éd.) *PhD Thesis, École Nationale des Travaux Publics de l'Etat (ENTPE)- Université de Lyon, France*.
- Olard, F. (2003). Comportement thermomécanique des enrobés bitumineux à basses températures. *PhD Thesis, École Nationale des Travaux Publics de l'Etat (ENTPE)- Université de Lyon, France*.
- Olard, F., & Di Benedetto, H. (2004). General "2S2P1D" Model and Relation Between the Linear Viscoelastic Behaviours of Bituminous Binders and Mixes. *Road Materials and Pavement Design*, 4(2/2003), 185-224.
- Özgan, E., & Serin, S. (2013). Investigation of Certain Engineering Characteristics of Asphalt Concrete Exposed to Freeze–Thaw Cycles. *Cold Regions Science and Technology*, 85, 131-136.
- Partl, M., Bahia, H. U., Canestrari, F., De la Roche, C., Di Benedetto, H., Piber, H., & Sybilski, D. (2012). STAR 206-ATB: Advances in Interlaboratory Testing and Evaluation of Bituminous Materials. Report of the RILEM Technical Committee 206-ATB unedited version (*Springer Science & Business Media*).
- Petersen, J. (1993). Asphalt Oxidation – An Overview Including a New Model for Oxidation Proposing That Physicochemical Factors Dominate the Oxidation Kinematics. *Fuel Science and Technology International*, 11(1), 57-87.
- Petersen, J., Branthaver, J., Robertson, R., Michael Harnsberger, P., Duvall, J., & Keith Ensley, E. (1993). Effects of Physicochemical Factors on Asphalt Oxidation Kinetics. *Transportation Research Record* (1391), 1-10.
- Ramirez Cardona, A. D. (2016). Characterisation of Thermomechanical Properties of Bituminous Mixtures Used for Railway Infrastructures. *PhD Thesis, École Nationale des Travaux Pulics de l'Etat (ENTPE)- Université de Lyon, France*.
- Ramirez Cardona, A. D., Di Benedetto, H., Sauzeat, C., Calon, N., & Saussine, G. (2017). Influence of Moisture Conditioning on Linear Viscoelastic Behaviour of Bituminous Mixtures Used For Railway Trackbeds. *Journal of Testing and Evaluation*, 45(1).
- Robert A., E., Robert H., J., & Edmund A., W. (1989). Pothole Primer: A Pulic Administrator's Guide to Undestanding and Managing the Pothole Problem. *US Army Corps of Engineers—Cold Regions Research & Engineering Laboratory* (Report 81-21).
- Solaimanian, M., Harvey, J., Tahmoressi, M., & Tandon, V. (2003). Test Methods to Predict Moisture Sensitivity of Hot-Mix Asphalt Pavements. *Moisture Sensitivity of Asphalt Pavements: A National Seminar*, 77-110.
- Terrel, R., & Al-Swailmi, S. (1994). Water Sensitivity of Asphalt-Aggregate Mixes: Test Selection. *Strategic Highway Research Program*, USA, SHRP-A/UIR-91-507.
- URF. (2016). FAITS ET CHIFFRES Octobre 2016 Statistiques des Transports. *Union Routière de France*, 3.
- Van den Bergh, W. (2011). The Effect of Aging on Fatigue and Healing Properties of Bituminous Mortars. *PhD Thesis, Delft University, Netherlands*.
- Vu, V.Thang. (2017). Étude expérimentale et numérique du comportement au gel et au dégel des enrobés bitumineux partiellement saturés. *PhD Thesis, École Centrale de Nantes*.

- Xu, H., Guo, W., & Tan, Y. (2015). Internal Structure Evolution of Asphalt Mixtures During Freeze–Thaw Cycles. *Materials & Design*, 86, 436-446.
- Yang, S., Braham, A., Wang, L., & Wang, Q. (2016). Influence of Aging and Moisture on Laboratory Performance of Asphalt Concrete. *Construction and Building Materials*, 115, 527-535.