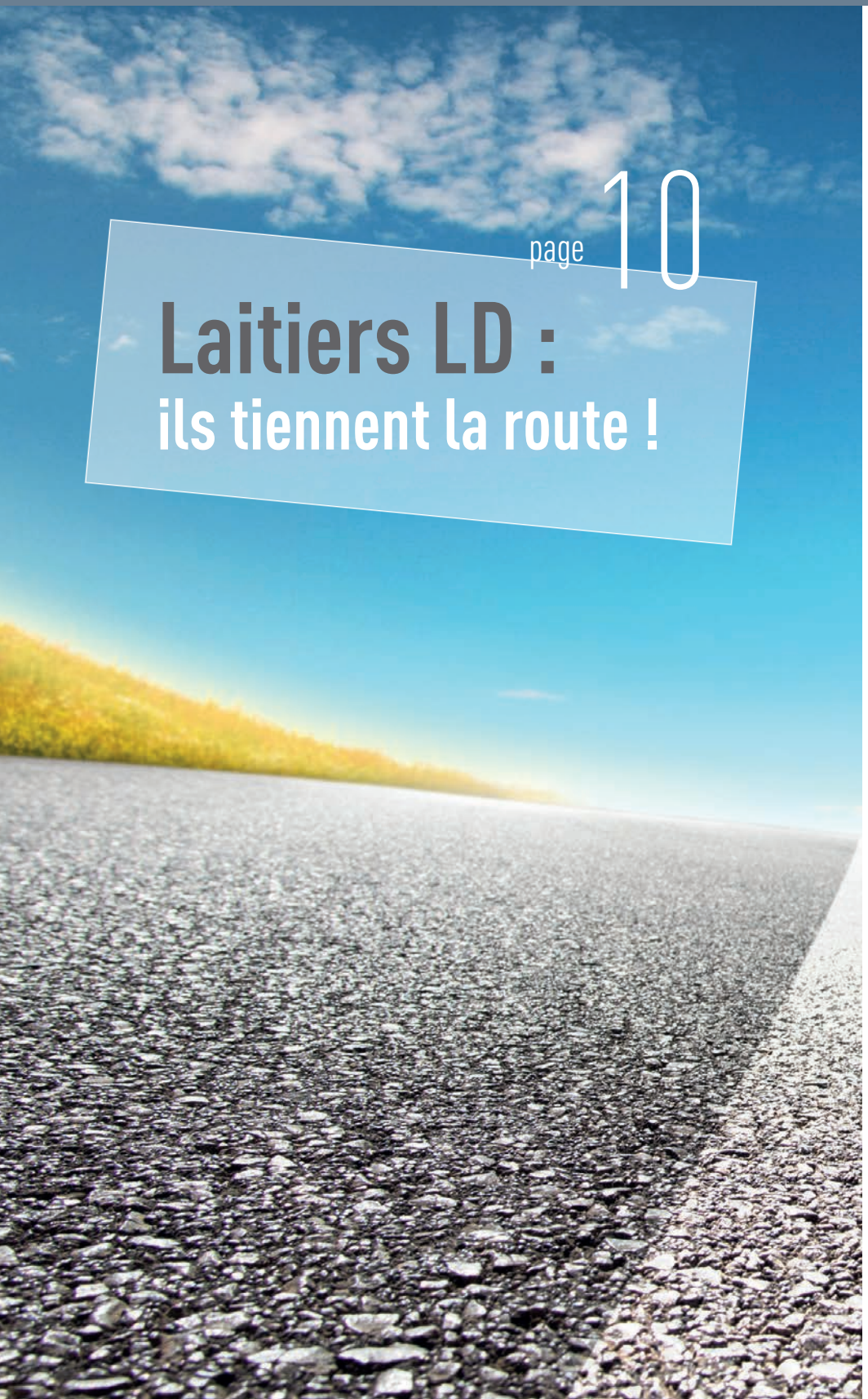
LAITIERS sidérurgiques

N°107
juin 2017



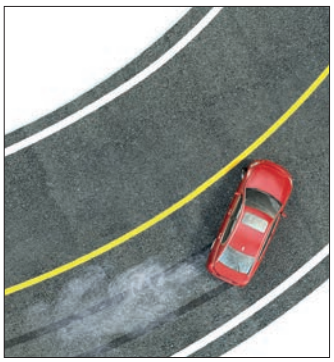
Laitiers LD : ils tiennent la route !

page 10

page 6 **Actualaitiers**

page 8 **Une nouvelle organisation** pour le CTPL

page 26 **En sécurité** avec les laitiers d'aciérie de four électrique



Niveau de performance réelle en matière de sécurité des enrobés bitumineux à base de laitiers d'aciérie

CTPL
CENTRE TECHNIQUE ET DE PROMOTION DES LAITIERS SIDERURGIQUES

édit

Roulez sereins !

Au moment où j'écris cet édito, les Etats-Unis sont en effervescence ! Le 28 mai a lieu le grand prix IndyCar des 500 miles d'Indianapolis, le plus grand spectacle sportif au monde avec plus de 350 000 spectateurs chaque année.
Pourquoi évoquer le circuit d'Indianapolis dans la revue des laitiers ?
Ce circuit est, depuis septembre 2004, la meilleure preuve de la qualité des revêtements bitumineux à base de laitiers d'aciérie*. En effet, c'est à cette date que le précédent revêtement à base de laitier cristallisé de haut-fourneau a été remplacé. Le choix d'un revêtement à base de laitier d'aciérie a été fait pour deux raisons essentielles : la sécurité accrue offerte par la rugosité, et la résistance à l'usure de ces granulats, ce qui permet de supporter les forces de cisaillement crées par des voitures lancées à plus de 350 km/h dans des virages à faible rayon ; la haute densité que l'on peut atteindre (> 94% dans ce cas) avec de telles formulations, densité qui permet de protéger la couche de brique datant de 1909 - et qui constituait le premier revêtement historique du circuit - des infiltrations d'eau.
Si cela donne satisfaction dans ces conditions extrêmes, pourquoi n'utilise-t'on pas davantage les laitiers sidérurgiques dans des ouvrages plus banals ? Cela avait d'ailleurs été fait, avec succès, il y a plusieurs années dans le sud-ouest, pour les approches (accélération/décélération) du péage autoroutier de Langon.
Ce numéro de la revue revient donc aux emplois « traditionnels » (mais un peu délaissés) des laitiers sidérurgiques : la route. Toutefois, et du fait d'une meilleure connaissance de leurs propriétés, il est maintenant possible de les prescrire dans les couches supérieures de la structure routière où leurs performances peuvent faire la différence. C'est ce que démontrent les deux articles suivants qui relatent des expériences anglaises et allemandes dans ce domaine.
Alors, lorsque cet été vous partirez en vacances sur nos routes françaises, pensez au confort et à la sécurité accrue que pourraient vous apporter les laitiers sidérurgiques…. Sans parler de la préservation des ressources naturelles.

Bonne lecture

Jacques Reynard
Président du CTPL

** Voir le numéro de janvier/février 2005 de la revue Hot Mix Asphalt Technology (HMAT)*

SOMMAIRE

page 6 **Actualaitiers**

page 8 **Une nouvelle organisation** pour le CTPL

page 10 **Laitiers LD :** Ils tiennent la route !

Les formules standard de bétons bitumineux pour les infrastructures routières se composent de granulats naturels et de bitume. D'importants efforts de recherche ont exploré, avec succès, les possibilités de remplacer le squelette granulaire conventionnel par des co-produits industriels tels que les laitiers issus de la production de l'acier. Cependant, on sait peu de chose sur les effets du laitier d'aciérie sur les propriétés et les performances des formules de bétons bitumineux, en particulier en matière de résistance à la fissuration à basse température et à la déformation permanente, de rigidité et de résistance à la fatigue.

Cet article présente une étude complète et approfondie sur les performances fondamentales de différentes formules de bétons bitumineux préparées avec 100% de granulats de laitiers d'aciérie de conversisseur LD. Une formule classique de référence contenant des granulats de Gabbro a été élaborée à des fins de comparaison. Des méthodes d'essais approfondis ont été utilisées pour évaluer les critères de performance de l'ensemble des formules considérées. Cette étude visait à étudier les propriétés en terme de fissuration à basse température, de résistance à la déformation permanente, de rigidité, de résistance à la fatigue et d'adhérence.

Les résultats expérimentaux et l'analyse menés dans la présente étude révèlent que les formules à base de laitiers LD conviennent pour la réalisation de couches de chaussées, et que dans la plupart des cas, elles atteignent un niveau de performance supérieur à celui des formules classiques à base de Gabbro.

J. Grönniger, M. P. Wistuba et I. Isailović - TU Braunschweig, ISBS, Germany
M. Mauhart - Voestalpine Stahl GmbH, Austria

page 26

En sécurité
avec les laitiers d'aciérie de four électrique

Au Royaume-Uni, la résistance au polissage et donc la rugosité des granulats destinés aux enrobés bitumineux est déterminée par un essai en laboratoire dénommé « valeur de polissage » (PSV- Polished Stone Value). Différentes valeurs de PSV sont spécifiées en fonction des conditions de circulation et des catégories de trafic. Les valeurs les plus élevées sont exigées pour les zones à risques avec un trafic poids lourds important.

Steelphalt, qui produit des enrobés bitumineux à base de laitier d'aciérie au Royaume-Uni, est convaincu depuis plusieurs années que le laitier d'aciérie de four électrique (LAFE) se comporterait mieux sur le terrain que ce que son PSV indiquerait. L'entreprise a donc mandaté le Laboratoire de Recherche sur les Transports (TRL) pour étudier sa performance sur site, comparée à son PSV.

L'étude a consisté à mesurer sur site l'adhérence d'un large panel de chaussées d'âges variés (de 2 ans à 18 ans de durée de service) et intégrant différents granulats de laitiers d'aciérie. Elle a prouvé que les laitiers d'aciérie LAFE présentent de meilleures performances que celles indiquées par leur PSV.

Alors que les granulats à PSV élevé tendent à se raréfier, l'intégration potentielle de laitiers d'aciérie dans la construction de routes en zones à risques permettrait de réduire la dépendance envers les ressources naturelles à PSV élevé.

N. Jones
Harsco Metals and Minerals, England

LAITIERS SIDERURGIQUES
71ème année
Revue éditée et diffusée gratuitement par le CTPL

Directeur de la publication
Jérémie DOMAS,
Délégué Général

Rédacteur en chef
Pascal LECONTE,
Directeur

Rédaction
CTPL
Site ArcelorMittal de Fos
Alie 1 - Bureau 120
13776 Fos-sur-Mer cedex

Siège social du CTPL
6, rue André Campra
Immeuble Le Cézanne
93212 La Plaine Saint Denis cedex
www.ctpl.info

Conception - Réalisation
BC Consultants :
01 30 74 09 00

Les articles publiés n'engagent que la responsabilité de leurs auteurs.

Crédit photos :
Fotolia

N° ISSN 1166 - 3138
Dépôt légal :
2ème trimestre 2017

ACTUA LAITIERS

Fonctionnement du CTPL

Réunions de l'AG et du CA du CTPL

Les dernières réunions du Conseil d'Administration (CA) et de l'Assemblée Générale (AG) du C.T.P.L. se sont tenues le mardi 11 avril 2017 au siège du CTPL à Saint-Denis. L'occasion de présenter à nos Adhérents les actions techniques, réglementaires et normatives réalisées au cours de l'année 2016, ainsi que les prochaines échéances et les prévisions budgétaires pour l'année 2017. La prochaine réunion du CA se déroulera en novembre prochain.

Le CTPL se réorganise

Suite au départ en retraite de son Délégué Général, M. Jacques REYNARD, à compter du 30 avril 2017, le CTPL a dû procéder à une restructuration et au recrutement d'un nouveau Directeur.
Pour en savoir plus, reportez-vous à l'article dédié dans ce numéro en pages 8 et 9.
L'occasion pour le CTPL et l'ensemble de ses Adhérents de rendre un hommage sincère et appuyé lors de la dernière Assemblée Générale, et de remercier M. Jacques REYNARD pour l'ensemble du travail accompli à la tête du CTPL.

International

Réunion des Groupes de Travail d'EUROSLAG

La dernière réunion des groupes de travail d'EUROSLAG s'est tenue au FEhS (Duisbourg, Allemagne) le mercredi 17 mai 2017. L'occasion pour le CTPL de faire le point avec l'ensemble des acteurs de la profession des laitiers sur les problématiques normative et réglementaire, et d'échanger sur les actions techniques en cours au sein des Etats Membres de l'UE.
L'Assemblée Générale de l'Association européenne des producteurs et opérateurs de laitiers sidérurgiques, EUROSLAG, se tiendra le mardi 28 novembre 2017 au FEhS à Duisbourg.

Conseil d'Administration d'EUROSLAG

Suite au départ en retraite de M. Jacques REYNARD au 30 avril 2017, il a été proposé lors du dernier Conseil d'Administration d'EUROSLAG que M. Jérémie DOMAS puisse le remplacer comme Administrateur représentant les producteurs et les opérateurs français.
Cette nomination, ainsi que d'autres nominations d'Administrateurs au Conseil seront soumis à l'approbation de la prochaine Assemblée Générale fin novembre 2017.
Les travaux du Conseil vont être prochainement consacrés à une refonte du fonctionnement et des orientations d'EUROSLAG :
- Définition des missions en coordination avec EUROFER,
- Examen des GT et de leur fonctionnement,
- Analyse des besoins (temps, expertise) éventuels d'un cadre permanent ou semi-permanent,
- Etc.

Conférence EUROSLAG

La 9ème conférence européenne sur les laitiers se tiendra du 11 au 13 octobre 2017 à Metz. Organisée cette année en France par EUROSLAG et soutenue par l'AFOCO, cette conférence internationale permettra de faire partager les dernières expériences et les technologies innovatrices en termes de gestion et de valorisation des laitiers.
A cette occasion, le CTPL a été retenu pour intervenir et présenter la situation réglementaire concernant le statut juridique des laitiers sidérurgiques en France, et les évolutions majeures obtenues à l'initiative du CTPL au cours de ces deux dernières années.
Une occasion rare de suivre en France cette manifestation organisée généralement à l'étranger !
Pour en savoir plus sur le programme technique détaillé et les visites programmées lors de cette conférence, ainsi que les modalités d'inscription, vous pouvez consulter le site officiel à l'adresse suivante :
www.euroslag2017.evenementcom.net

Réglementation nationale et européenne

Statut juridique des laitiers sidérurgiques

Depuis la publication de notre dernier numéro (N°106, juin 2016) de la revue Laitiers Sidérurgiques, le C.T.P.L. continue de suivre de très près avec l'Administration les différents dossiers dans le cadre de la modification du statut juridique de déchet des laitiers sidérurgiques.
Pour rappel, en mars 2016, le Ministère en charge de l'environnement reconnaissait à juste titre que *«les laitiers de haut fourneau vitrifiés peuvent être considérés comme une substance et non plus comme un déchet »*.
En parallèle, un second dossier concernant la sortie du statut de déchet (SSD) pour les laitiers de haut-fourneau cristallisés et les laitiers d'aciérie (filières convertisseur et électrique) utilisés en technique routière et en travaux publics a été déposé en mai 2016 et est en cours d'instruction. Ce dossier a été présenté devant la Commission nationale Consultative sur la SSD le 13 octobre 2016, et a fait l'objet d'une liste de demandes d'informations complémentaires par les services instructeurs au cours du premier trimestre 2017. Une réunion avec les parties prenantes devrait être prochainement organisée sous l'égide du Ministère afin d'échanger sur les modalités d'élaboration d'un projet d'arrêté ministériel définissant les conditions de SSD des laitiers utilisés dans ces usages.
Enfin, un projet d'arrêté ministériel de SSD relatif au statut juridique des laitiers d'aciérie de conversion utilisés en tant qu'amendements minéraux basiques a été mis en consultation le 21 octobre 2016. A ce jour, aucune publication officielle de ce texte n'est parue, mais nous ne désespérons pas que cela aboutisse prochainement.
Par conséquent, et même si nous ne sommes pas encore rentrés dans l'ère de la simplification administrative voulue, les choses semblent donc enfin bouger dans le bon sens pour les laitiers et l'évolution de leur statut juridique !

Dossier d'enregistrement des laitiers sidérurgiques dans REACH

L'Assemblée Générale du REACH Ferrous Slag Consortium s'est tenue à Düsseldorf le jeudi 23 mars 2017. L'occasion pour le CTPL, mandaté par plusieurs sites sidérurgiques français adhérents, de faire un état des lieux de l'avancement de la révision du chemical safety report (CSR) et des actions engagées par le Consortium depuis un an.

Normalisation

CEN/TC 51 – Ciment et liants hydrauliques

La dernière réunion de la commission de normalisation P15A, groupe miroir français du TC51 s'est tenue le 12 mai 2017. Le sujet majeur de préoccupation reste le blocage du mandat M114 et de l'annexe ZA au niveau de la commission européenne, qui entrave la parution de plusieurs normes. Certaines d'entre elles arrivent à la fin de leur délai de révision, et une clarification n'est pas espérée avant fin 2017. Plus précisément, concernant les laitiers, certains pays ont souhaité la réintroduction des LAFE comme constituants secondaires des ciments.

CEN/TC104 – Bétons

Lors des dernières réunions des commissions P18B et P18C, la classification des granulats recyclés dans les bétons a été évoquée. Ce sujet touche à la fois le TC104 et le TC154, mais les responsables du TC104 ont souhaité la réactivation du TG19 afin de travailler en commun avec le TC154 sur le nouveau projet de classification qui pourrait impacter les normes bétons et granulats. Ce document, d'une rare complexité et dont la mise en application sur les sites apparaît plus qu'incertaine, intègre les laitiers dans une rubrique « Ru » signifiant « non lié » sans autre distinction. Le CTPL s'est donc prononcé contre ce projet, compte tenu du manque de clarté et de réalisme quant à son application.

CEN/TC154 – Granulats

Révision des normes européennes

La commission nationale du BN TRA Granulats établit les positions françaises concernant la révision de l'ensemble des normes européennes pour les granulats. Les usages en technique routière (GNT, GTLH, enduits et enrobés) mais également en bétons et mortiers, comme ballasts ou comme enrochements pour la construction d'ouvrages hydrauliques ou de génie civil sont ainsi visés.

La publication de ces différents textes normatifs prend un retard considérable compte tenu de l'harmonisation des textes, des nouvelles règles du CEN, mais surtout des obligations administratives liées à la publication au journal officiel de l'Union Européenne des normes harmonisées. Ceci est à mettre en relation avec leur utilisation pour le marquage CE des granulats, conformément aux exigences du Règlement Produits de Construction. A ce jour, la publication de la nouvelle version de ces normes n'est donc pas attendue avant le milieu de l'année 2018.

CEN/TC 260 – Engrais et amendements minéraux basiques

Travaux français du BN FERTI

Les travaux de la Commission Dénomination, Spécifications et Marquage (DSM) se sont poursuivis concernant le projet de révision de la norme européenne prEN 14069 (2015) - Amendements minéraux basiques - Dénominations, spécifications et étiquetage. La position officielle de la France est de s'opposer à l'inclusion d'autres laitiers sidérurgiques que les laitiers d'aciérie de conversion moulus. Cependant, il est vraisemblable que cette position de pur repli stratégique de certains industriels français ne soit pas suivie au niveau européen, compte tenu des expériences et des pratiques existantes au sein de plusieurs autres pays, en Allemagne en particulier.

De son côté, le groupe de travail dédié aux Amendements Minéraux Basiques (AMB) a poursuivi et terminé la révision de la norme française prNF U44-001. En cohérence avec les prescriptions de la norme européenne EN 14069, le CTPL a proposé des aménagements afin de considérer les laitiers de poche comme des gisements d'amendements possibles, ainsi que l'élargissement des granulométries autorisées (laitiers seulement criblés). Enfin, une modification des limites environnementales a été proposée pour les laitiers de conversion, avec la prise en compte d'une valeur pour le Chrome hexavalent < 4ppm sans autre référence au Chrome total non pertinent.

L'ensemble de ces propositions n'ont pas été pour l'instant complètement retenues, dans l'attente d'un dossier technique conforme à la procédure pour l'inclusion de nouvelles sources d'AMB ... une démonstration supplémentaire du protectionnisme des acteurs de ce marché.

CEN/TC351 – Emission de substances dangereuses réglementées à partir de produits de construction

WG3 – Radioactivité des Produits de Construction

Le vote formel sur le projet de norme TS 00351014 «Détermination des concentrations d'activité des radioéléments 226Ra, 232Th et 40K par spectrométrie de rayons gamma (γ) » a été lancé.

L'enquête sur le rapport technique relatif à « l'évaluation de la dose » s'est achevée au premier trimestre, et la finalisation de ce document devrait aboutir d'ici la fin du premier semestre 2017.

Communication

Valorisation des matériaux alternatifs : vers une accélération de leur utilisation ?

Après le succès des journées COTITA tenues au second trimestre de 2015, puis celle organisée par le CEREMA de l'Est en décembre 2016, c'est l'AFOCO qui programmait le 18 mai 2017, en collaboration avec FEDEREC, une journée technique nationale à Paris sur les guides d'acceptabilité environnementale encadrant l'utilisation des matériaux alternatifs en technique routière.

Le CTPL a présenté lors de cette journée les lignes directrices du guide dédié aux laitiers sidérurgiques, publié en octobre 2012, et a mis en exergue les performances techniques et environnementales des laitiers sidérurgiques, et les engagements pris par la profession.

Cette journée d'échanges interprofessionnels, en présence de représentants de l'Administration (CEREMA, Ministère de l'environnement, ...), a été également l'occasion pour le CTPL de faire un état des lieux des avantages de ces outils, mais également d'insister auprès des acteurs de la profession sur l'importance de leur utilisation dans le cadre de la prescription pour les marchés publics ou privés.

... Et l'IDRRIM publie sa Note d'information n°32 : « Acceptabilité environnementale des matériaux alternatifs en technique routière »

Hasard ou coïncidence ? C'est le moment (avril 2017) que l'IDRRIM (Institut des Routes, des Rues et des Infrastructures pour la Mobilité) a choisi pour publier sa nouvelle Note d'information, pourtant en gestation depuis plus de deux ans, concernant les guides du SETRA/CEREMA permettant d'évaluer l'acceptabilité environnementale.

Dixit l'IDRRIM, « *cette note d'information a pour objet de présenter la démarche d'acceptabilité environnementale des matériaux alternatifs en technique routière, et sa déclinaison opérationnelle pour trois types de matériaux granulaires : les matériaux de déconstruction du BTP, les laitiers sidérurgiques, et les mâchefers d'incinération de déchets non dangereux.* »

L'objectif affiché de cette publication : rendre encore plus lisible et apporter une crédibilité supplémentaire à l'utilisation et à la prescription des matériaux alternatifs - dont les laitiers sidérurgiques - à l'ensemble des acteurs représentatifs des organisations publiques et privées du domaine des infrastructures routières l'utilisation et la prescription des matériaux alternatifs, dont en particulier les laitiers sidérurgiques.

Une pierre de plus à l'édifice !

Pour en savoir plus sur ce document, vous pouvez directement télécharger cette note :

- sur le site de l'IDDRIM
www.idrrim.com/publications/5041.htm
- sur le site du CTPL
www.ctpl.info/publications/documentation-diverse/

Le CTPL se reorganise !

Depuis le 1er mai 2017, le CTPL se retrouve un peu «orphelin».
Jacques REYNARD, Délégué Général du CTPL pendant près de 15 ans, a pris une retraite bien méritée après de nombreuses années passées dans les domaines de la construction et de la sidérurgie.
Cependant, son départ a été anticipé et préparé depuis plusieurs mois, et l'association a pris les décisions nécessaires.

Lors de sa dernière Assemblée Générale, il a été proposé que **Jérémie DOMAS** le remplace dans ses fonctions de Délégué Général et prenne la direction exécutive du CTPL, avec effet au 1er mai 2017.

Jérémie DOMAS, 47 ans, Docteur ès Sciences et Techniques de l'Environnement de l'École Nationale des Ponts et Chaussées (E.N.P.C.), a soutenu en 1999 une thèse sur la valorisation en travaux publics des sables issus des boues de curage des réseaux d'assainissement.
Formé au sein de l'INERIS entre 1999 et 2008, il était Directeur du CTPL depuis septembre 2008.

Pour remplacer Jérémie DOMAS dans ses anciennes fonctions, le CTPL a recruté son nouveau Directeur : **Pascal LECONTE** a ainsi pris ses fonctions le 3 avril dernier et est basé sur le site ArcelorMittal de Dunkerque.

Agé de 48 ans, titulaire d'un Diplôme d'Ingénieur Chimiste et d'un DEA de l'Université Technologique de Compiègne, il a débuté sa carrière dans un groupe de matériaux de construction indépendant, puis a rejoint le groupe ORSA comme responsable Qualité. Par la suite, il a passé plusieurs années au sein de SEFI INTRAFOR (groupe FAYAT) comme ingénieur travaux en fondations spéciales.
Dernièrement, il a occupé le poste de chef de marché chez LHOIST (producteur de chaux) avec des responsabilités techniques et commerciales.
Nous lui souhaitons pleine réussite dans ses nouvelles fonctions et la réalisation de ses missions.

Une réflexion globale a été engagée avec l'ensemble des permanents du CTPL, afin de définir la répartition des dossiers compte tenu des compétences techniques et de l'expérience des permanents, ainsi que des priorités dans les actions du CTPL. D'ores et déjà, deux de leurs objectifs principaux seront de travailler sur l'évolution du statut juridique des laitiers et d'améliorer les filières d'utilisation des laitiers, notamment comme amendements agricoles ou en techniques routières.

Jacques REYNARD a été reconduit lors de la dernière Assemblée Générale du 11 avril 2017 comme Administrateur et reste Président du CTPL. Il apportera toute son expertise concernant la stratégie et la définition des grandes orientations de l'association.

Le CTPL en bref

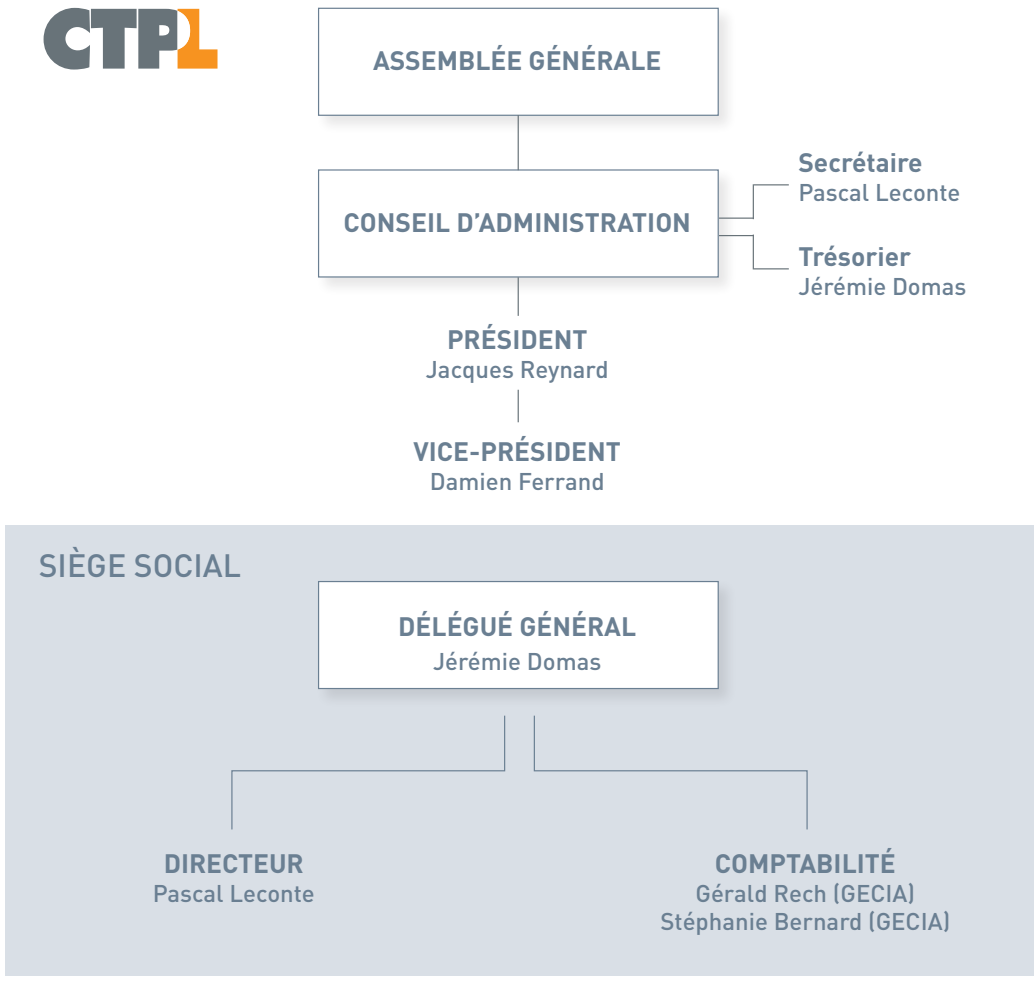
Le CTPL, Centre Technique et de Promotion des Laitiers sidérurgiques, est une association régie par la loi de 1901.

Il a pour missions essentielles :
• d'entreprendre des études visant à améliorer les caractéristiques des laitiers sidérurgiques et à mieux appréhender leurs qualités eu égard aux conditions de leur utilisation,
• de mener des actions pour promouvoir et développer l'utilisation des laitiers sidérurgiques.

L'association est administrée par un Conseil d'Administration dont les membres sont nommés par l'Assemblée générale.

Le Conseil d'Administration nomme parmi ses membres un président et un vice président, pour un mandat d'un an reconductible, ainsi qu'un secrétaire et un trésorier.
Le président de l'Association a pour mission de la représenter et de veiller à son bon fonctionnement en s'appuyant sur son Délégué Général à qui il peut déléguer tout ou partie de ses pouvoirs.
Le Délégué Général et le Directeur du CTPL travaillent, au quotidien, à la bonne conduite des missions de l'association.

Parmi ses adhérents, l'association compte des membres de plein droit, les producteurs de laitiers implantés sur le territoire français, et des membres associés, principalement les opérateurs.



Laitiers LD :
Ils tiennent la route !

Les formules standard de bétons bitumineux pour les infrastructures routières se composent de granulats naturels et de bitume. D'importants efforts de recherche ont exploré, avec succès, les possibilités de remplacer le squelette granulaire conventionnel par des co-produits industriels tels que les laitiers issus de la production de l'acier. Cependant, on sait peu de chose sur les effets du laitier d'aciérie sur les propriétés et les performances des formules de bétons bitumineux, en particulier en matière de résistance à la fissuration à basse température et à la déformation permanente, de rigidité et de résistance à la fatigue.

Cet article présente une étude complète et approfondie sur les performances fondamentales de différentes formules de bétons bitumineux préparées avec 100% de granulats de laitiers d'aciérie de convertisseur LD. Une formule classique de référence contenant des granulats de gabbro[1] a été élaborée à des fins de comparaison. Des méthodes d'essais approfondis ont été utilisées pour évaluer les critères de performance de l'ensemble des formules considérées. Cette étude visait à étudier les propriétés en terme de fissuration à basse température, de résistance à la déformation permanente, de rigidité, de résistance à la fatigue et d'adhérence.

Les résultats expérimentaux et l'analyse menés dans la présente étude révèlent que les formules à base de laitiers LD conviennent pour la réalisation de couches de chaussées, et que dans la plupart des cas, elles atteignent un niveau de performance supérieur à celui des formules classiques à base de gabbro.

J. Grönniger, M. P. Wistuba et I. Isailović
TU Braunschweig, ISBS, Germany
M. Mauhart
Voestalpine Stahl GmbH, Austria

Contexte et étendue de l'étude

Utilisation des laitiers dans les enrobés bitumineux

La production de l'acier génère une quantité importante de co-produits, en particulier des laitiers sidérurgiques, à raison d'environ 1 tonne pour 3 tonnes d'acier [1].
En Europe, chaque année, près de 12 millions de tonnes de laitiers d'aciérie sont ainsi produites. L'union Européenne compte parmi ses objectifs d'optimiser l'utilisation des ressources naturelles ; dans ce cadre, l'industrie des enrobés bitumineux se doit de recycler des co-produits industriels, tels que les laitiers d'aciérie.

En Allemagne, l'utilisation des laitiers dans les enrobés bitumineux est une pratique ancienne. Des efforts importants ont été consentis par l'Association allemande de Recherche (GRA) sur les laitiers de haut fourneau (LHF) et d'aciérie LD, afin d'acquérir une excellente connaissance de leurs propriétés [2]. Au niveau international, les activités de recherche se sont concentrées sur les propriétés chimiques et physiques des laitiers utilisés dans les enrobés bitumineux. Wu et al. ont étudié la possibilité d'utiliser les laitiers d'aciérie comme granulats dans les enrobés bitumineux de type SMA[2] (Stone Mastic Asphalt), un enrobé coulé sur place ; les modifications mécanochimiques et physiques des laitiers d'aciérie ont été étudiées via des techniques de diffraction aux rayons X (DRX), de microscopie électronique à balayage (MEB), de thermogravimétrie (TGA) et par des tests de porosité au mercure [3]. A travers ces expériences, les auteurs ont conclu que les granulats de laitiers d'aciérie peuvent être utilisés comme une source alternative, économique et respectueuse de l'environnement [4]. L'utilisation des laitiers dans les enrobés bitumineux a également été abordée par Hassan et Khabiri [5] et Norman et al. [6] sur la base d'essais Marshall et de stabilité conformément à la norme européenne EN 12697-34 [7]. Kara et al. ont utilisé des laitiers d'aciérie pour préparer des formules d'enrobés pour couches de base, de liaison et de roulement [8], [9] ; selon les auteurs, les propriétés physiques des laitiers d'aciérie répondaient aux critères de production des enrobés bitumineux. En ce qui concerne la rugosité des enrobés bitumineux contenant des laitiers d'aciérie, Asi a démontré que les formules contenant 30% de laitiers présentaient le coefficient de rugosité le plus élevé comparé aux formules de type Superpave, SMA ou Marshall [10]. De plus, il a été identifié un effet positif des laitiers d'aciérie en matière de résistance à l'orniérage et à la fatigue [11].

L'un des inconvénients associé à l'emploi des laitiers d'aciérie réside dans l'expansion volumique potentielle causée par l'hydratation de la chaux libre ou de la magnésie résiduelle qu'ils contiennent. Ainsi, des niveaux élevés de chaux libre ou de magnésie peuvent provoquer des gonflements et des fissurations des enrobés. La solution la plus simple pour limiter cet effet nuisible consiste à soumettre les laitiers à une cure ou à accélérer la réaction de gonflement par hydratation. On peut également parfois procéder au lavage des laitiers de façon à limiter leur expansion volumique [12].

Objectif

L'objectif de la présente étude consiste à déterminer dans quelle mesure l'emploi de laitiers LD dans les enrobés bitumineux affecte les performances fonctionnelles des couches d'assises de chaussées et plus précisément, en les comparant à une formule classique préparée à base de granulats naturels tels que du gabbro[1].
Les enseignements de cette étude et les conséquences pour l'industrie routière sont exposés dans cet article.

1 - Roche naturelle, magmatique d'origine plutonique, de texture grenue, composée essentiellement de pyroxène et de feldspath. Elle est de couleur verte à noire et est utilisée en raison de sa grande dureté comme granulat pour les couches de roulement, en enrobés ou en enduits superficiels.

2 - « Stone Mastic Asphalt » (SMA), technique d'enrobés bitumineux développée en Allemagne dans les années 60 et qui s'est répandue en Europe, aux Etats-Unis et au Canada. La technique repose sur un squelette granulaire exempt de sable et sur un taux élevé de liant bitumineux. En France, la technique courante correspondante peut être un BBSG (Béton Bitumineux Semi Grenu) ou un BBTM (Béton Bitumineux Très Mince). L'acronyme MA « Mastic Asphalt » renvoie à une technique plus riche en sable.

Approche méthodologique

L'approche utilisée dans cette étude est basée sur un vaste programme expérimental qui comprend plusieurs méthodes d'essai pour déterminer les différentes propriétés mécaniques. En particulier, on s'attachera aux comparaisons des performances obtenues avec la formule à base de gabbro et celle à partir de laitiers LD.

Les propriétés suivantes ont été évaluées pour un ensemble de 8 formules, illustrant l'utilisation dans les différentes couches de chaussées : couche de surface (roulement), couche de liaison ou couche de base [13] :

- Résistance à la déformation permanente[3],
- Rigidité,
- Résistance à la fatigue,
- Résistance à la fissuration à basse température,
- Rugosité de la couche de surface.

Matériels d'étude

Au total, 8 formules d'enrobés ont été préparées dans la section des produits bitumineux du laboratoire routier : quatre formules avec des granulats de Gabbro et quatre avec des laitiers LD. En matière de liants bitumineux, ont été choisis un bitume standard 50/70, un liant modifié de type SBS de grade 45/80-65[4] avec un indice de pénétration conforme à la norme européenne EN 1426 [14] et une valeur bille anneau conforme à la norme européenne prEN 1427 [15] :

- MA 11 S (couche de surface, Mastic Asphalt, avec une forte teneur en filler),
- SMA 11 S (couche de surface, Stone Mastic Asphalt, faible teneur en filler),
- AC 16 B S (couche de liaison, béton bitumineux avec des granulats de 16 mm de diamètre maximum)
- AC 22 T S (couche de base, béton bitumineux avec des granulats de 22 mm de diamètre maximum).

Le tableau 1 présente un récapitulatif des mélanges de revêtement formulés.

Les formules d'enrobés ont été choisies en veillant à ce que toutes les couches d'une structure d'assises de chaussée (couche de surface, couche de liaison, couche de base) soient prises en compte. De plus, des formules traditionnelles d'enrobés avec différentes teneurs en filler ont été utilisées.
L'adéquation des formules a été choisie en conformité avec les normes techniques de construction allemandes (German Technical Standard) : TL Asphalt -StB 07, [16].

Méthodes d'essai

Afin d'étudier les performances mécaniques, la durabilité et la rugosité des enrobés bitumineux à base de laitier LD et de granulat conventionnel (naturel) de Gabbro, des échantillons de revêtement ont été produits, puis testés conformément aux méthodes décrites ci-après. Les résultats obtenus pour les échantillons à base de laitiers LD ont alors été comparés aux données expérimentales relevées pour les enrobés fabriqués à partir de gabbro. Les résultats et analyses sont présentés en fin d'article.

MÉLANGE, COUCHE	TYPE DE LIANT	GABBRO*	LAITIER LD
Mastic Asphalt, couche de surface	MA 11 S, SBS 45/80-65	M1	M2
Stone Mastic Asphalt, couche de surface	SMA 11 S, 50/70	S1	S2
Béton bitumineux, couche de liaison	AC 16 B S, SBS 45/80-65	B1	B2
Béton bitumineux, couche de base	AC 22 T S, 50/70	T1	T2

** Granulat de référence*

Tableau 1
Formules de revêtement utilisés.

3 - Contrairement à certains matériaux « durs » comme l'acier, le béton hydraulique, les matériaux bitumineux ont un comportement mixte mêlant une composante visqueuse (ou plastique) et une composante élastique, ce qui conduit à observer au delà d'une certaine sollicitation un phénomène de fluage et de déformation permanente.

4 - Le grade est un couple de 2 chiffres qui traduit un intervalle de pénétrabilité du bitume avec une aiguille. Un 20/30 désigne un bitume qui se situe entre 20 et 30 dixièmes de millimètre. Un 35/50, 35 et 50 dixièmes, autrement dit plus le chiffre est élevé plus le bitume est mou. Un bitume modifié SBS signifie un bitume de grade pur auquel on a rajouté des polymères afin de modifier ses propriétés. Ici, le SBS signifie Styrène Butadiène Styrène, soit un élastomère thermoplastique.

Résistance à la déformation permanente

La résistance à la déformation a été étudiée respectivement pour :

- Les formules SMA 11 S, AC 16 B S et AC 22 T S en essais de chargements cycliques conformes respectivement à la norme européenne EN 12697-25 [17] et à la norme allemande TP Asphalt -StB , Part 25 B1 [18],
- La formule MA 11 S en essai de pénétration en conformité respectivement avec la norme européenne EN 12697-25 [17] et la norme allemande TP Asphalt -StB, Part 25 A1 [19].

Dans les essais de chargements cycliques (Figure 3, gauche), un échantillon cylindrique est soumis à une répétition de chargement pendant 0,2 s, suivie d'une période de repos de 1,5 s, le tout à une température de 50°C. Durant l'essai, des déformations irréversibles le long de la zone sollicitée sont enregistrées pour chaque cycle de pression. L'échantillon est positionné au centre du châssis de chargement afin d'assurer une répartition uniforme de la charge.
La courbe de chargement est caractérisée par une contrainte minimale σ_u et une contrainte maximale σ_o (Figure 1). Le rôle de la contrainte σ_u est d'assurer le contact entre l'échantillon et la plaque de chargement. L'essai débute avec l'application du premier cycle de charge. Une contrainte maximale de σ_o = 0.35 MPa a été retenue pour la durée de l'épreuve.

Le test prend fin au bout de 10 000 cycles ou bien lorsque la déformation mesurée dépasse les 40 ‰. L'interprétation repose sur la courbe de fluage qui met en évidence l'évolution des déformations irréversibles permanentes de l'échantillon. (Figure 2).

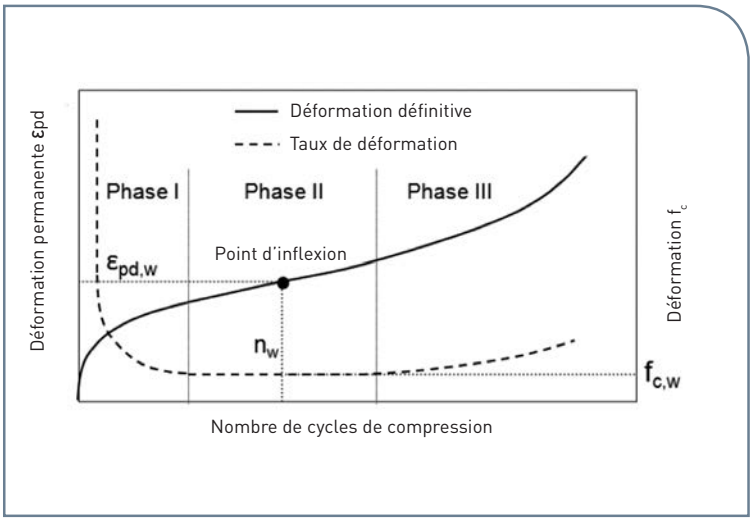


Figure 2
Courbe de fluage résultant d'un test de chargements cycliques

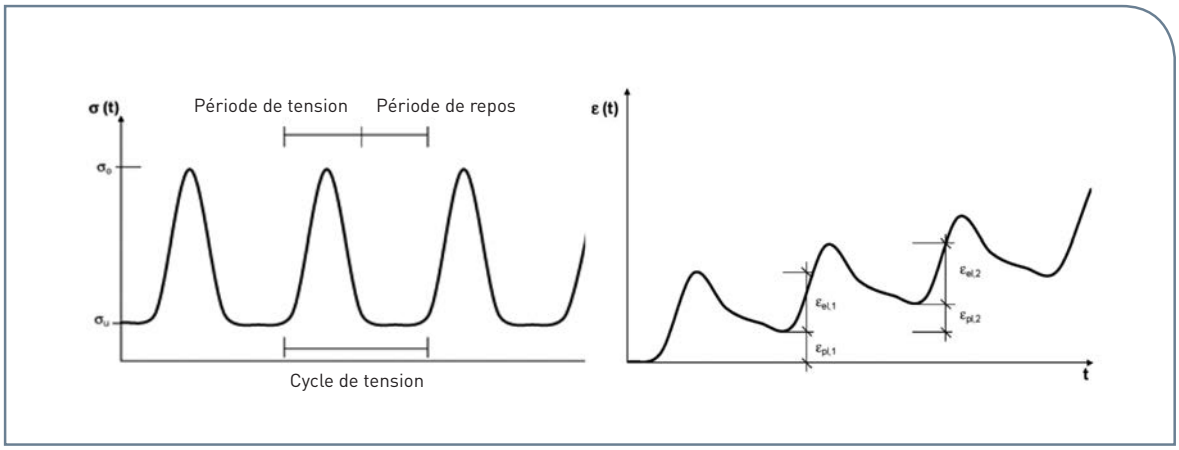


Figure 1
Conditions de chargement et déformation élastiques (εrl) et plastiques (εpl) induites dans le test de compression cyclique.

On note un point particulièrement important dans la phase II : le point d'inflexion matérialisé par un couple (Nw, nombre de cycle associé à fc,w un taux de déformation). Il permet d'évaluer la résistance à la déformation :

- Nombre de cycles de chargement au point d'inflexion n_w [-],
- Déformation au point d'inflexion ε_w [‰],
- Taux de déformation au point d'inflexion ε_w* [‰ * 10^{-4} / n].

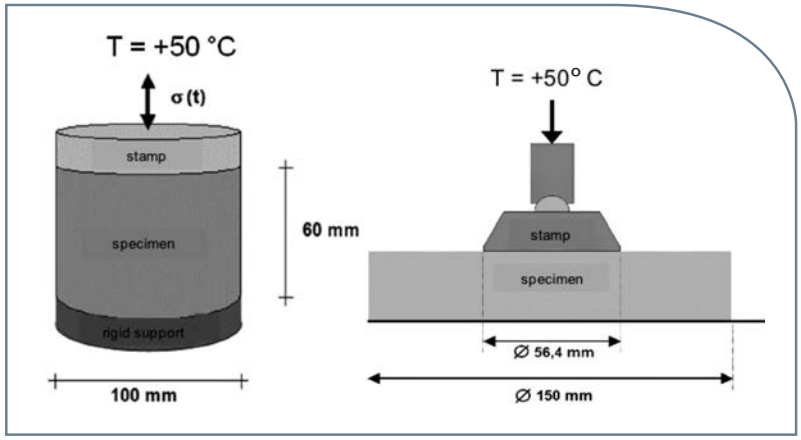


Figure 3
Essai de chargements cycliques (gauche).
Essai de pénétration (droite).

Dans l'essai de pénétration (Figure 3, droite), on mesure la pénétration dynamique (ET_{dyn}). L'échantillon est soumis à une charge sinusoïdale pendant 0,2 s suivie d'une période de repos de 1,5 s. L'essai s'achève au bout de 2 500 cycles (c'est à dire charge + période de repos). La profondeur de pénétration est consignée en fin de test. La température de l'essai s'élève à 50°C.

Rigidité et résistance à la fatigue

La rigidité et la résistance à la fatigue (test à la rupture sous chargement répété) sont évaluées par des essais cycliques de résistance indirecte à la traction conformément respectivement à la norme européenne EN 12697-24 [20] et la norme allemande AL Sp Asphalt 09 [21]. Une charge sinusoïdale est appliquée à un échantillon cylindrique d'enrobé via deux rails de chargement diamétralement opposés. Afin de stabiliser la position de l'échantillon d'enrobé dans le châssis de chargement, une contrainte seuil équivalente à σ_u = 0.035 MPa est appliquée, tandis que la charge maximale σ_o est retenue sur la base d'une contrainte horizontale d'élasticité ε_{el} entre 50 et 100 µm/m. Les essais sont réalisés selon une double variation température-fréquence tel que décrit dans le tableau 2. Il en résulte un paramètre dénommé module de rigidité (|*E*|) en fonction de la fréquence, représenté par une courbe d'isotherme et une courbe maîtresse.

La résistance à la fatigue est évaluée selon une procédure de chargement cyclique continue sur le domaine non-linéaire. On fait varier la contrainte de telle façon que la déformation initiale se situe dans une fourchette comprise entre 0,05 et 0,30 ‰ et que le nombre de cycles aboutissant à la rupture (diminution de 50% du module de rigidité) se situe entre 10 000 et 1 000 000 de cycles. Les conditions expérimentales de réalisation de l'essai sont décrites dans le tableau 3, en particulier le nombre de cycles de chargement avant la rupture, ainsi que la droite caractéristique de fatigue.

PARAMÈTRES	VALEURS/RÉPONSES
Température de test [°C]	+20 ; +10 ; 0 ; -10
Fréquence de charge [Hz]	0.1, 1, 5 et 10
Résultats	Module de rigidité |*E*| en [MPa] et courbe maîtresse

Tableau 2
Paramètres expérimentaux pour la détermination de la rigidité via l'essai cyclique de résistance indirecte à la traction conforme aux normes EN 12697-24 et Al Sp-Asphalt 09.

PARAMÈTRES	VALEURS/RÉPONSES
Température de test [°C]	+20
Fréquence de charge [Hz]	10
Résultats	• Nombre de cycles de tension jusqu'aux macrofissures
	• Fonction de fatigue $N_{Makro} = C_1 * \varepsilon_{el,anf}^{C_2}$ avec paramètres spécifiques au matériau C_1 et C_2

Tableau 3
Paramètres expérimentaux pour déterminer la résistance à la fatigue via l'essai cyclique de résistance indirecte à la traction conforme aux normes EN 12697-24 et Al Sp-Asphalt 09.

Résistance à la fissuration à basse température - Retrait empêché

Afin d'évaluer la résistance à la fissuration à basse température, des échantillons prismatiques d'enrobés bitumineux ont été soumis à un essai de « retrait empêché », conformément respectivement à la norme européenne EN 12697-46 [22] et à la norme allemande «Technische Prüfvorschrift Verhalten von Asphalten bei tiefen Temperaturen» [23].
En amont du test, des échantillons prismatiques de dimensions 40x40x160 mm³ ont été collés sur des supports en acier. Après une période de durcissement de la colle de 48h minimum, les échantillons sont installés dans le dispositif d'essai, voir Figure 4.

Pendant le test de « retrait empêché », la longueur de l'échantillon est maintenue constante grâce à un dispositif d'élongation à pas variable (LVDT) pendant que sa température est abaissée depuis sa valeur initiale de T = + 20 °C à un rythme constant de ΔT = -10 °C/h. Un système de contrôle en circuit fermé maintient l'échantillon à une longueur constante. Pendant ce retrait thermique empêché, l'échantillon est soumis à une contrainte axiale croissante, d'origine cryogénique. L'essai s'achève dès lors que la température minimale atteint T = -40°C ou à défaut, quand la contrainte résultante est supérieure à la contrainte admissible par l'échantillon.
L'essai restitue une courbe de contrainte en fonction de la température σ_{cry} (T) [MPa], une contrainte de rupture σ_F [MPa] et une température de rupture T_F [°C].

Figure 4
Dispositif d'essai utilisé pour réaliser l'essai de « retrait empêché ».

Rugosité - Adhérence

La rugosité de la couche de surface d'un enrobé bitumineux est déterminée en évaluant son coefficient de frottement selon la norme allemande TP Gestein-StB, Part 5.4.2 [24]. Pour cela, on utilise une machine Wehner et Schulze (Figure 4) pour polir la surface de l'échantillon, permettant de mesurer ainsi le frottement.

Une face de l'échantillon d'enrobé bitumineux, façonné sous forme de disque, est tout d'abord polie de façon à révéler partiellement la surface des granulats. La surface est ensuite traitée par sablage afin d'éliminer tout le bitume et le mastic résiduels. L'échantillon est soumis au départ à un polissage suivi par une mesure du coefficient de frottement dans le dispositif d'essai. (Figure 5). Lors du processus de polissage, la simulation de l'exposition au trafic est réalisée via trois rouleaux de caoutchouc lisses qui polissent la surface pendant 1 heure à raison de 500 tours par minute. En complément, l'effet de polissage est intensifié par l'injection continue d'un mélange d'eau et de poudre de quartz sur la surface de l'échantillon pour simuler de façon accélérée l'effet du trafic. La mesure du coefficient de frottement est réalisée par 3 dispositifs en caoutchouc à rotation circonférentielle (100 km/h) qui sont abaissés sur la surface humide de l'échantillon et sont ainsi freinés. La force de frottement nécessaire pour arrêter l'élément de mesure en caoutchouc est enregistrée. Le coefficient de frottement est déterminé par la force de frottement rapportée à la force verticale du dispositif en caoutchouc à 60 km/h.

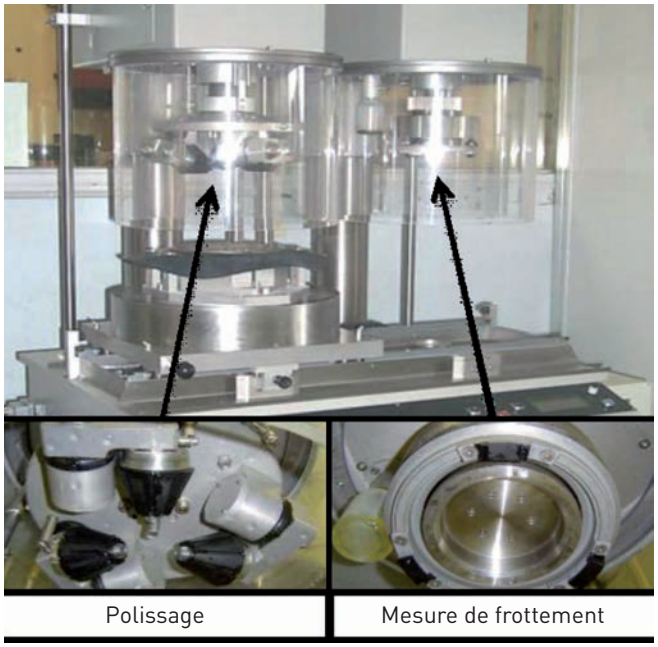


Figure 5
Machine Wehner et Schulze pour évaluer la rugosité par détermination du coefficient de frottement.

Résultats et analyses

Résistance à la déformation permanente

Les profondeurs de pénétration observées pour les formules Mastic Asphalt MA 11 S avec du laitier LD et avec du gabbro sont présentées sur la Figure 6, (gauche). Après 2 500 cycles de chargement, la formule MA 11 S avec des granulats de laitier LD affiche une profondeur de pénétration nettement plus faible que celle du MA à base de gabbro.
L'utilisation de laitiers LD dans les enrobés bitumineux offre une meilleure résistance à la déformation permanente comparé aux mêmes formules à base de granulat naturel de gabbro.

La résistance à la déformation des formules SMA 11 S (Figure 6, droite) affiche la même tendance que celle des formules Mastic Asphalt. Le nombre de chargements supportables jusqu'au point d'inflexion concernant le SMA à base de laitier LD est sensiblement plus élevé que pour la formule SMA 11 S à base de gabbro. Les déformations qui en résultent sont d'amplitude comparable. De ce fait, on observe des tendances similaires pour les formules Mastic Asphalt MA et pour les Stone Mastic Asphalt SMA utilisant des granulats de laitier.

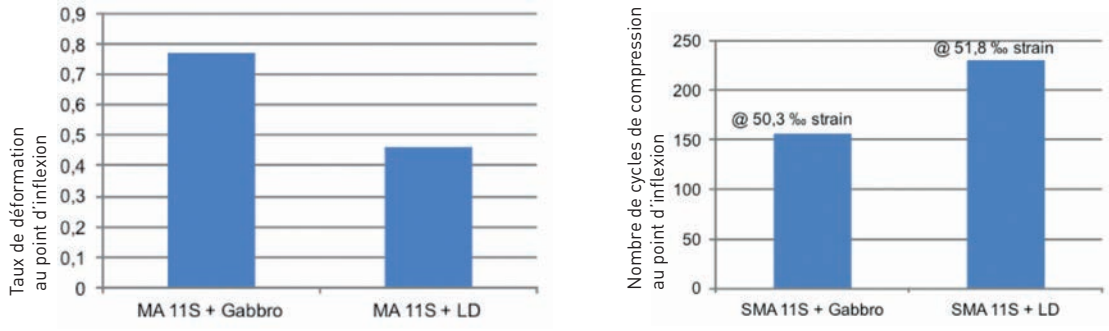


Figure 6
Résistance à la déformation des formules Mastic Alphat MA 11 S à base de laitier LD et de gabbro (gauche); Résistance à la déformation des formules de Stone Mastic Asphalt SMA 11 S à base de laitier LD et de gabbro (droite).

La résistance à la déformation en terme de nombre de cycles de charges jusqu'au point d'inflexion concernant les enrobés dans les couches de liaison et de base (AC 16 B S et AC 22 T S respectivement avec ldu aitier LD et avec du gabbro) est présentée sur la Figure 7. Les résultats indiquent une tendance inverse à celle des enrobés pour couche de surface (MA and SMA). Le nombre de cycles de chargement supportables jusqu'au point d'inflexion est bien inférieur pour les formules préparées avec des laitiers LD ; Les déformations qui en résultent sont d'amplitude comparable.

En ce qui concerne le comportement à la déformation médiocre des formules pour couche de liaison et pour couche de base préparées avec des laitiers LD, il convient de noter qu'une formulation similaire (même grade de bitume et même concentration) a été utilisée pour les mélanges contenant des granulats naturels et recyclés.
Par conséquent, les mélanges à base de laitiers LD affichent une teneur en vides d'air supérieure (jusqu'à 3,0% en volume). Ceci peut s'expliquer par le fait que les laitiers LD demandent davantage de liant bitumineux en raison de leur structure plus poreuse. Des teneurs en vides d'air élevées ont un effet négatif sur la rigidité et la résistance à la déformation permanente.

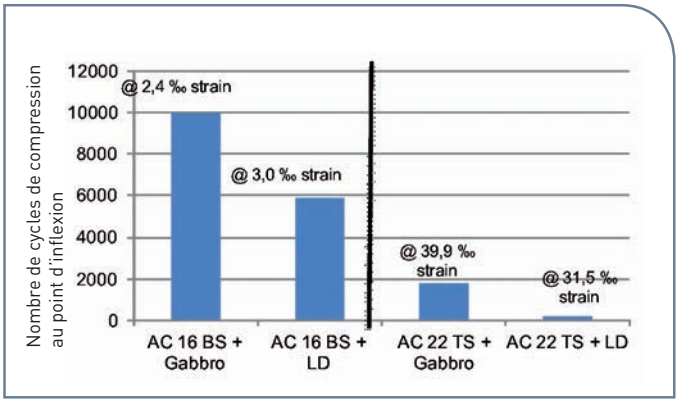


Figure 7
Résistance à la déformation des formules pour couches de liaison AC 16 B S à base de laitier LD et de gabbro (gauche). Résistance à la déformation de la couche de base AC 22 T S à base de laitier LD et de gabbro (droite).

Rigidité et résistance à la fatigue

La rigidité des enrobés bitumineux pour couche de surface (Mastic Asphalt MA 11 S et Stone Mastic Asphalt SMA 11 S, chacun préparé avec du laitier LD et du gabbro) est présentée sur la Figure 8 en terme de module E (module complexe) en fonction de la température. La rigidité observée se situe à un niveau comparable pour tous les enrobés de surface, indépendamment de l'utilisation de laitier LD ou de gabbro.

La rigidité des formules pour couche de liaison et couche de base (AC 16 B S et AC 22 T S, chacune avec du laitier LD ou du gabbro) est présentée sur la Figure 9. Dans ce cas également, le module-E est globalement similaire, que l'on utilise du laitier LD ou du gabbro.

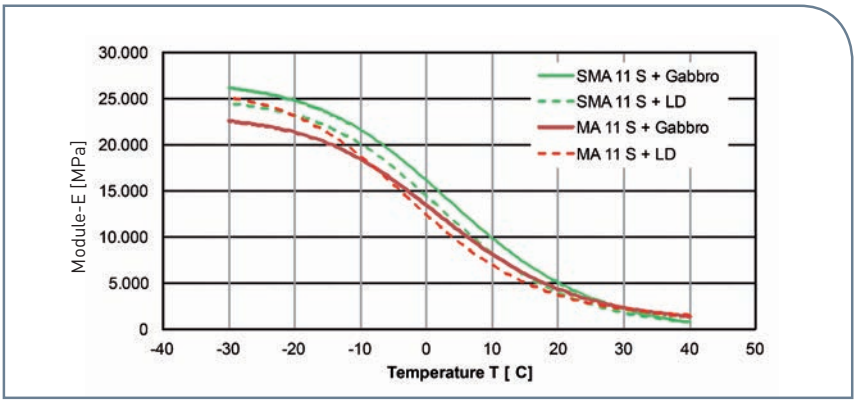


Figure 8
Rigidité du Mastic Asphalt MA 11 S et du Stone Mastic Asphalt SMA 11 S : Module-E [MPa] en fonction de la température, observé pour les formules à base de laitier LD (lignes en pointillés) et de gabbro (lignes pleines).

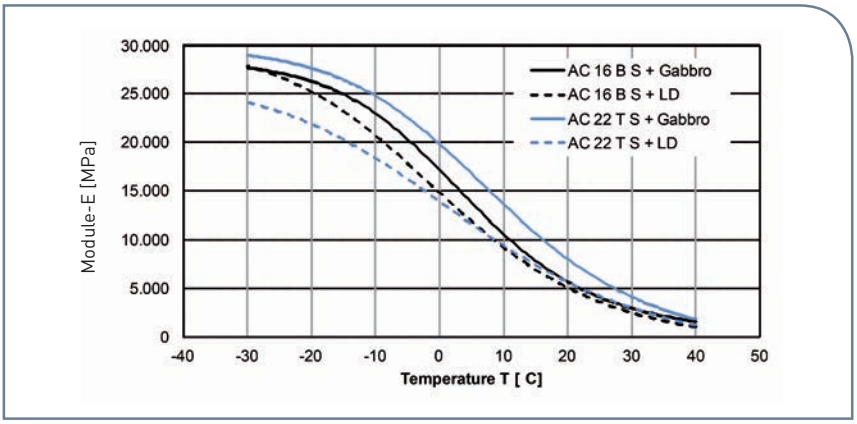


Figure 9
Rigidité des couches de liaison AC 16 B S et des couches de base AC 22 T S : Module-E [MPa] en fonction de la température, observé pour les formules à base de laitier LD (lignes en pointillés) et de gabbro (lignes pleines).

Globalement, on observe une légère diminution de la rigidité pour les formules à base de laitiers LD. Cependant, ceci est négligeable et ne peut affecter la performance de la couche d'assise de chaussée exposée à la charge du trafic.
Les résistances à la fatigue des formules de couche de surface (Mastic Asphalt MA 11 S et Stone Mastic Asphalt SMA 11 S, chacune à base de laitier LD ou de gabbro) sont présentées sous forme de courbes de Wöhler sur la Figure 10. Les formules à base de granulats naturels ou recyclés (laitier LD) présentent une résistance à la fatigue similaire.

Les résistances à la fatigue des différentes formules pour couche de liaison et couche de base (AC 16 B S and AC 22 T S, chacune à base de laitier LD ou de gabbro) sont présentées sous forme de courbe de Wöhler sur la Figure 11.

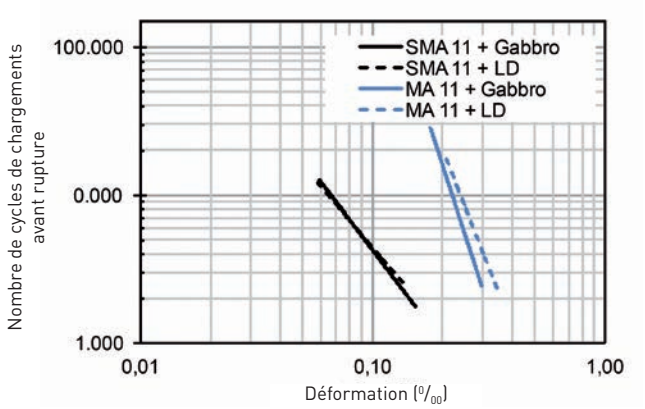


Figure 10
Résistance à la fatigue du Mastic Asphalt MA 11 S et du Stone Mastic Asphalt SMA 11 S : courbes de Wöhler observées pour les différents enrobés à base de laitier LD (lignes en pointillés) et de gabbro (lignes pleines).

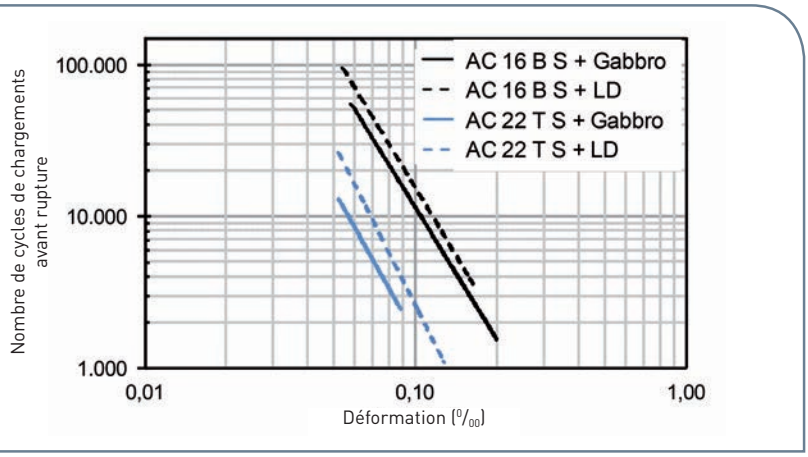


Figure 11
Résistance à la fatigue des couches de liaison AC 16 B S et des couches de base AC 22 T S : courbes de Wöhler observées pour les différents enrobés à base de laitier LD (lignes en pointillés) et de gabbro (lignes pleines).

Les courbes de Wöhler des enrobés bitumineux pour couche de liaison et couche de base préparés à base de laitiers LD sont décalées vers le haut de manière presque parallèle par rapport à celles des formules à base de granulats naturels. Ainsi pour une même déformation élastique, les formules à base de laitier LD peuvent supporter un plus grand nombre de cycles de chargement avant rupture. En conséquence, les résultats expérimentaux démontrent que l'utilisation des laitiers LD dans les couches de liaison et les couches de base permet d'obtenir une meilleure résistance à la fatigue par rapport aux formules élaborées à partir de gabbro.

Résistance à la fissuration à basse température

Les résistances à la fissuration à basse température pour les couches de surface (MA 11 S et SMA 11 S, chacune à base de laitier LD ou de granulat naturel de gabbro) ont été déterminées sur la base des essais de « retrait empêché ». La Figure 12 illustre la contrainte de rupture (contrainte maximale jusqu'à la rupture) alors que la Figure 13 présente la relation température - rupture.

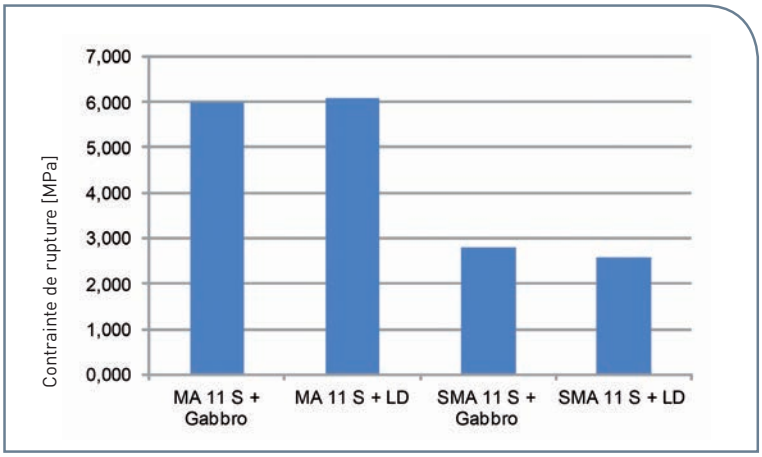


Figure 12
Résistance à la fissuration à basse température du Mastic Asphalt MA 11 S et du Stone Mastic Asphalt SMA 11 S : contrainte de rupture [MPa] observée pour les formules à base de laitier LD et de gabbro.

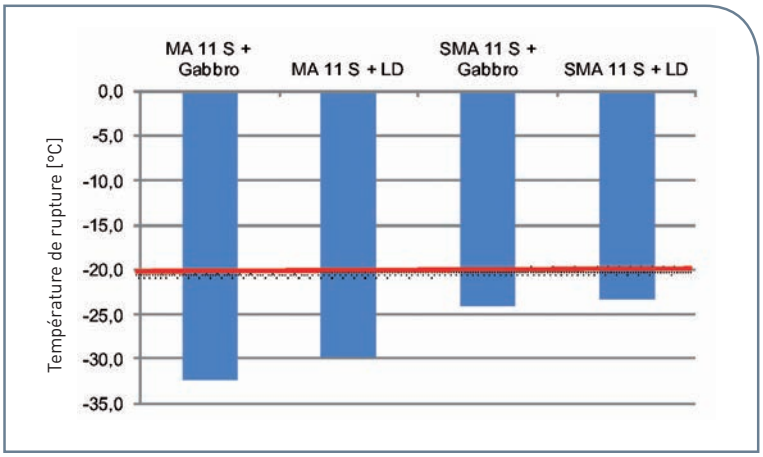


Figure 13
Résistance à la fissuration thermique du Mastic Asphalt MA 11 S et du Stone Mastic Asphalt SMA 11 S : température de rupture [°C] observée pour les mélanges à base de laitier LD et de gabbro.

Les paramètres qui déterminent la résistance à la fissuration à basse température sont comparables, qu'il s'agisse des couches de surface préparées avec du laitier LD ou avec du granulat naturel. Les ruptures observées se situent à un niveau élevé (bon). Ce niveau est conforme aux dispositions pour les couches de surface couramment en vigueur en Europe. Les températures de rupture sont inférieures à T = -20 °C (selon la Figure 13), et donc se situent à un niveau non-critique pour un risque de fissuration thermique.

La résistance à la fissuration thermique des formules pour couche de liaison et couche de base (AC 16 B S et AC 22 T S, chacune à base de LD ou de gabbro) est exposée sur la Figure 14 et la Figure 15.

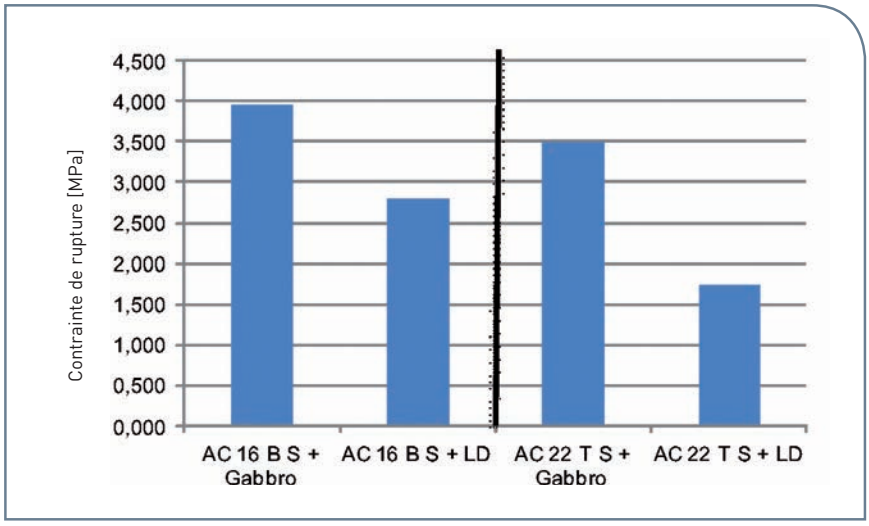


Figure 14
Résistance à la fissuration à basse température des couches de liaison AC 16 B S et des couches de base AC 22 T S : contrainte de rupture [MPa] observée pour les formules à base de laitier LD et de gabbro.

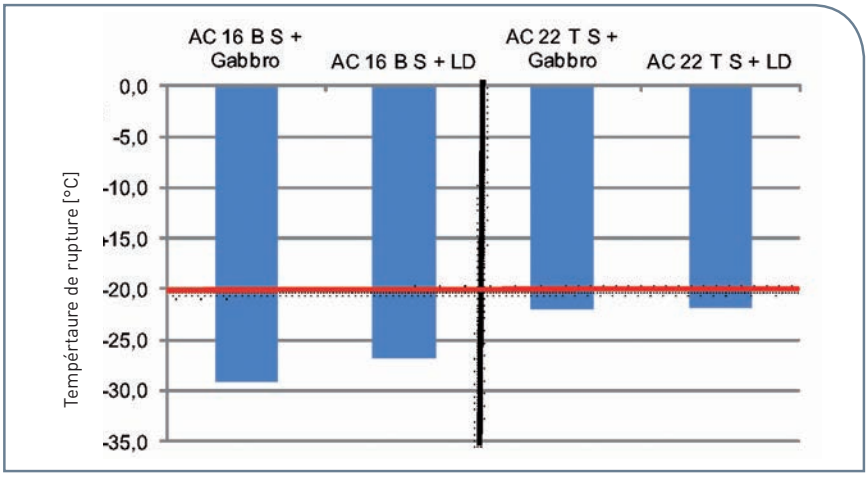


Figure 15
Résistance à la fissuration thermique des couches de liaison AC 16 B S et des couches de base AC 22 T S : température de rupture [°C] observée pour les mélanges avec du laitier LD et avec du gabbro.

Les paramètres qui caractérisent la résistance à la fissuration thermique indiquent que le comportement à basse température des formules à base de laitier LD tend à présenter une performance relativement moins bonne comparée à celle des mélanges à base de gabbro. Les contraintes de rupture sont plus basses et les températures de rupture sont plus élevées. Cependant, le niveau de performance est estimé comme « suffisant » compte tenu des conditions climatiques européennes.

Rugosité - Adhérence

La rugosité des formules pour couche de surface (Mastic Asphalt MA 11 S et Stone Mastic Asphalt SMA 11 S, chacune à base de laitier LD ou de granulat naturel de gabbro) est appréhendée en mesurant les coefficients de frottement à l'issue de 90 000 et 180 000 cycles de polissage, tel que présenté sur les Figures 16 et 17.

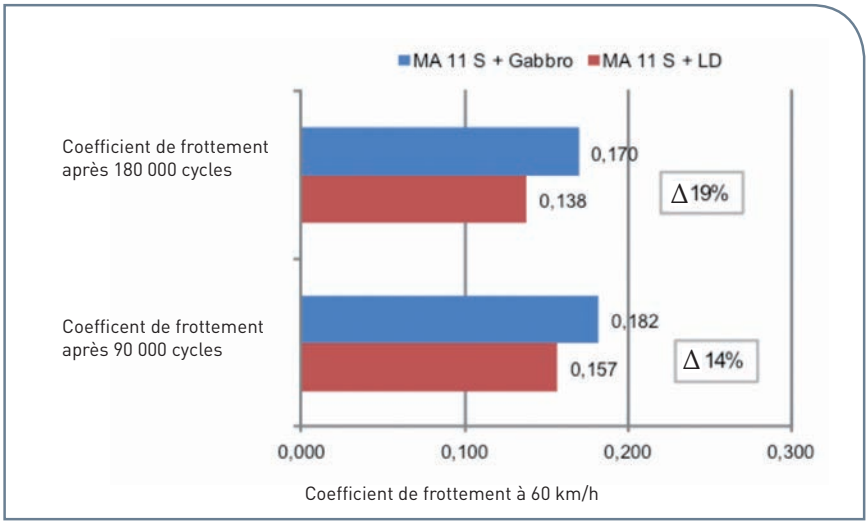


Figure 16
Rugosité d'une couche de surface réalisée en Mastic Asphalt MA 11 à base de laitier LD comparée à celle à base de gabbro.

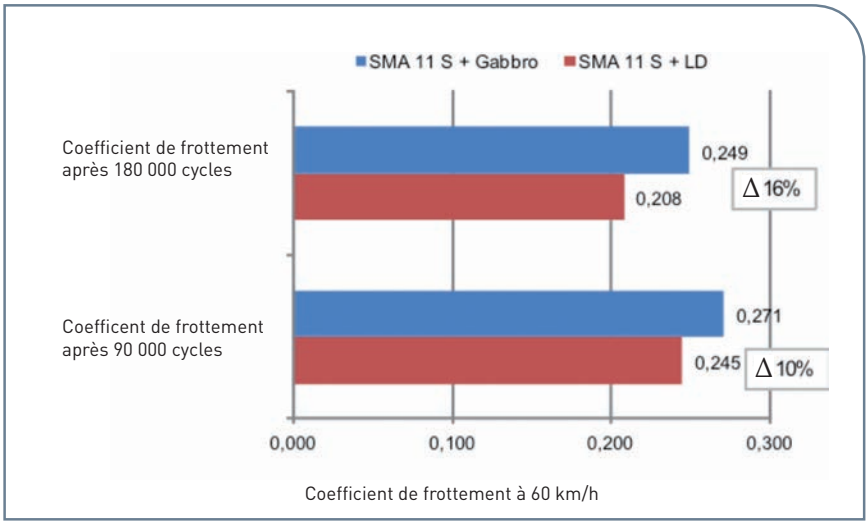


Figure 17
Rugosité d'une couche de surface réalisée en Stone Mastic Asphalt SMA 11 S à base de laitier LD comparée à celle à base de gabbro.

On observe que les coefficients de frottement des mélanges à base de laitier LD obtenus après 90 000 et 180 000 cycles de polissage sont 15 à 20% inférieurs à ceux des mélanges à base de gabbro pour ce qui concerne les formules MA et 10 à 16% inférieur pour les formules SMA.
Ainsi, l'adhérence des formules à base de laitier LD est légèrement plus faible que celle des formules préparées avec du granulat naturel. Cependant, les coefficients de frottement se situent à un niveau très élevé, qui permet largement de satisfaire les objectifs en matière de sécurité.

Résumé et conclusions

Cet article a permis de faire le point sur les performances essentielles des différents types d'enrobés bitumineux élaborés avec 100% de laitier LD d'une part, et avec du granulat naturel d'autre part. La résistance à la déformation permanente, la rigidité, la fatigue, la fissuration à basse température et l'adhérence des couches de surface ont été évaluées par un ensemble complet de méthodes expérimentales. Il est possible de retenir les conclusions suivantes :

• Les laitiers LD utilisés dans les enrobés bitumineux en couche de surface offrent une meilleure résistance à la déformation que le gabbro. En revanche, les couches de liaison et les couches de base préparées avec du laitier LD affichent une résistance à la déformation plus faibles que celles à base de gabbro. Ceci peut s'expliquer par la composition volumétrique des enrobés. Les laitiers LD demandant davantage de bitume, les enrobés à base de laitier LD affichent une teneur légèrement supérieure en vides d'air qui altère modérément leur résistance à la déformation.

• Les rigidités des couches de surface, couche de liaison et couche de base se situent à des niveaux comparables, indépendamment du granulat utilisé, laitier LD ou de gabbro.

• Les résistances à la fatigue des enrobés pour couche de surface se situent à des niveaux comparables indépendamment de l'utilisation de laitier LD ou de gabbro. L'utilisation de laitier LD dans les enrobés pour couche de liaison et couche de base permet d'offrir une meilleure résistance à la fatigue que celle obtenue avec les mélanges à base de gabbro.

• Le niveau de résistance à la fissuration thermique est similaire pour toutes les formules, indépendamment de l'utilisation de laitier LD ou de Gabbro. Le niveau est jugé «satisfaisant» dans le contexte climatique européen.

• L'adhérence avec les formules à base de laitier LD tend à être légèrement plus faible que celle obtenue avec les formules à base de granulat naturel. Cependant, les coefficients de frottement se situent à un niveau très élevé, considéré comme non-critique.

Globalement, les résultats expérimentaux et les analyses rapportés dans la présente étude indiquent que les formules d'enrobés bitumineux élaborées avec des laitiers LD sont tout à fait adéquates pour la construction de couches d'assises de chaussées et que dans la plupart des cas, leurs performances sont équivalentes, voir supérieures à celles des formules conventionnelles réalisées à partir de granulats naturels.

Références

[1] D.M. Proctor, K.A. Fehling, E.C. Shay: Physical and chemical characteristics of blast furnace, basic oxygen furnace, and electric arc furnace steel industry slags, Environ. Sci. Technol., 34 (2000), pp. 1576–1582.

[2] Motz, H., Geiseler, J.: Products of steel slags an opportunity to save natural resources, Waste Manage., 21 (2001), pp. 285–293.

[3] Wu, S., Xue, J., Ye, Q., Chen,Y.: Utilization of steel slag as aggregates for stone mastic asphalt (SMA) mixtures, Build. Environ., 42 (7) (2007), pp. 2580–2585.

[4] Xue, Y., Wu, S., Hou, H., Zha, J.: Experimental investigation of basic oxygen furnace slag used as aggregate in asphalt mixture, J. Hazard. Mater., 138 (16) (2006), pp. 261–268.

[5] Hassan, Z., Khabiri, M.: Preventive maintenance of flexible pavement and mechanical properties of steel slag in asphalt J. Environ. Eng. Landscape Manage., 15 (3) (2007), pp. 188b–192b.

[6] Norman, A., Joseph, C., Papagiannakis, T., Theriault, E.G., Bergan, A.T.: Use of Steel Slag in Asphaltic Concrete, 1147 ASTM Special Technical Publication (1992) pp. 3-18.

[7] European Committee for Standardization (CEN): European Standard EN 12697-34. Bituminous mixtures. Test methods for hot mix asphalt. Marshall test, (2012), Brussels.

[8] Kara, M., Gunay, E., Kavakli, B., Tayfur, S., Eren, K., Karadag, G.: The use of steel slag in asphaltic mixture, Key Eng. Mater., 264–268 (III) (2004), pp. 2493–2496.

[9] Kandhal, P. S., Hoffman, G. L.: Evaluation of steel slag fine aggregate in hot-mix asphalt mixtures,Transportation. Research. Record 1583, (1997), pp. 28–36.

[10] Asi, I.M.: Evaluating skid resistance of different asphalt concrete mixes, Build. Environ., 42 (2007), pp. 325–329.

[11] Asi, I.M., Qasrawi, H.Y., Shalabi, F.I.: Use of steel slag aggregate in asphalt concrete mixes, Can. J. Civil Eng., 34 (8) (2007), pp. 902–911.

[12] Kneller, W. A., Gupta, J., Borkowski, M. L., Dollimore, D.: Determination of original free lime content of weathered iron and steel slags by thermogravimetric analysis, Transportation Research Record 1434, National Research Council, Washington, DC, (1994).

[13] MS-4: The Asphalt Handbook, Asphalt Institute, College Park Medison, (1989), Vol. 4.

[14] European Committee for Standardization (CEN): European Standard EN 1426. Bitumen and bituminous binders - Determination of needle penetration, (2013), Brussels.

[15] European Committee for Standardization (CEN): European Standard prEN 1427. Bitumen and bituminous binders - Determination of the softening point - Ring and Ball method, (2013), Brussels.

[16] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV): Technische Lieferbedingungen für Asphaltmischgut für den Bau von Verkehrsflächenbefestigungen (TL Asphalt-StB 07), (2007). Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln.

[17] European Committee for Standardization (CEN): Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 25: Cyclic compression test, (2005), Brussels.

[18] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV): Technische Prüfvorschriften für Asphalt im Straßenbau, Teil 25 B 1: Einaxialer Druckschwellversuch – Bestimmung des Verformungswiderstands von Walzasphalt bei Wärme (TP Asphalt-StB, Teil 25 B 1), (2010). Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln.

[19] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV): Technische Prüfvorschriften für Asphalt im Straßenbau, Teil 25 A 1: Dynamischer Stempeleindringversuch an Gussasphalt (TP Asphalt-StB, Teil 25 A 1), (2010). Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln.

[20] European Committee for Standardization (CEN): Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 24: Resistance to fatigue, (2012), Brussels.

[21] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV): Arbeitsanleitung zur Bestimmung des Steifigkeits- und Ermüdungsverhaltens von Asphalten mit dem Spaltzug-Schwellversuch als Eingangsgröße in die Dimensionierung von Asphaltbefestigungen (AL-SP–ASPHALT09), (2009). Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln.

[22] European Committee for Standardization (CEN): Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 46: Low temperature cracking and properties by uniaxial tension tests, (2012), Brussels.

[23] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV): Technische Prüfvorschrift Verhalten von Asphalten bei tiefen Temperaturen. (1994).

[24] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV): Technische Prüfvorschriften für Gesteinskörnungen im Straßenbau, Teil. 5.4.2: Bestimmung des Polierwertes mit den Verfahren nach Wehner/Schulze (TP Gestein-StB, Teil 5.4.2), (2010). Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln.

En sécurité
avec les laitiers d'aciérie de four électrique

Au Royaume Uni, la résistance au polissage et donc la rugosité des granulats destinés aux enrobés bitumineux est déterminée par un essai en laboratoire dénommé « valeur de polissage » (PSV- Polished Stone Value)[5]. Différentes valeurs de PSV sont spécifiées en fonction des conditions de circulation et des catégories de trafic. Les valeurs les plus élevées sont exigées pour les zones à risques avec un trafic poids lourds important.

Steelphalt, qui produit des enrobés bitumineux à base de laitier d'aciérie au Royaume-Uni, est convaincu depuis plusieurs années que le laitier d'aciérie de four électrique (LAFE) se comporterait mieux sur le terrain que ce que son PSV indiquerait. L'entreprise a donc mandaté le Laboratoire de Recherche sur les Transports (TRL) pour étudier sa performance sur site comparée à son PSV.

L'étude a consisté à mesurer sur site l'adhérence d'un large panel de chaussées d'âges variés (de 2 ans à 18 ans de durée de service) et intégrant différents granulats de laitiers d'aciérie. Elle a prouvé que les laitiers d'aciérie LAFE présentent de meilleures performances que celles indiquées par leur PSV.

Alors que les granulats à PSV élevé tendent à se raréfier, l'intégration potentielle de laitiers d'aciérie dans la construction de routes en zones à risques permettrait de réduire la dépendance envers les ressources naturelles à PSV élevé.

N. Jones
Harsco Metals and Minerals, England

ROYAUME-UNI

Niveau de performance réelle en matière de sécurité des enrobés bitumineux à base de laitiers d'aciérie

Les granulats de laitier d'aciérie sont utilisés dans la fabrication d'enrobés bitumineux au Royaume-Uni depuis plus de 80 ans. Il semblerait que les enrobés contenant des granulats de laitiers d'aciérie présenteraient sur site de meilleures performances en terme d'adhérence, que ce qu'indiqueraient les valeurs de PSV[5] obtenues en laboratoire (Roe, 2003).
Les enrobés à base de laitier d'aciérie ont également été reconnus à la fois pour leur durabilité et pour leur durée de service, supérieures à celles des enrobés à base de granulats naturels.

Steelphalt, société de négoce du groupe Harsco Metals and Minerals, produit depuis plus de 50 ans une gamme de surfaçage pour enrobés, en intégrant des laitiers d'aciérie (LAFE) sous forme de gravillons ou de fractions fines.
Dans le but de valider l'idée d'un retour d'expérience sur site meilleur que prévu, Steelphalt a décidé de mandater le «Transport Research Laboratory» (TRL) - Laboratoire de Recherche sur les Transports - afin d'évaluer le niveau de performance effectif de ses produits.

Cet article résume la méthodologie et les principaux résultats relatifs à l'évaluation de différents critères de performance, tels que l'adhérence sur site et la durabilité.

Méthodologie

Un certain nombre de sections d'enrobés bitumineux à base de laitiers d'aciérie ont été retenus, en tenant compte du type de produit, de la situation spécifique de la section courante et de l'importance du trafic. Deux études distinctes ont été conduites pour évaluer à la fois l'état effectif de la surface de l'enrobé et la rugosité sur site, tout en considérant l'âge des chaussées.
Trois types d'enrobés de référence ont été étudiés : le tableau 1 recense le type de produit, l'année de mise en œuvre et la densité du trafic en nombre de véhicules utilitaires par jour (VUJ)[6] pour chacune des 18 sections étudiées.

N° DE SECTION	PRODUIT	AGE (années)	TRAFIC (nb de véhicules /jour)
1	HRA[7] 14 (45%)	9	1586
2	SMA[8] 14	9	3916
3	SMA 14	9	11711
4	SteelFlow[9] 6	1	156
5	SMA 14	17	2018
6	SMA 10	9	n/c
7	SteelFlow 6	1	62
8	SMA 14	10	3231
9	SMA 10	9	80
10	SMA 14	7	4974
11	SMA 10	8	4974
12	SteelFlow 6	3	46
13	UltraGrip[9] 10	2	3246
14	UltraGrip 10	17	1122
15	SMA 14	2	3206
16	SMA 14	6	2770
17	HRA 14 (55%)	3	4024
18	UltraGrip 10	3	2352

Tableau 1
Caractéristiques des sites étudiés

5 - « Polished Stone Value », Essai de laboratoire permettant de qualifier l'état de surface d'un granulat sous l'angle de sa rugosité résiduelle après une période d'abrasion normalisée. Cet essai correspond à l'ancien Coefficient de Polissage Accéléré français (le CPA), utilisé pour qualifier les granulats pour couche de roulement en complément du Los Angeles (LA) et du Micro Deval (MDE).

6 - Véhicules Utilitaires par jour, connu en France sous l'équivalent de la classe de trafic en nombre de poids lourds par jour. Un poids lourd représente une contrainte de 130 kN/essieu, ce qui permet de considérer le dimensionnement de la chaussée. Dans l'article, le concept de véhicules utilitaires ou commerciaux peut être envisagé à partir d'un PTAC de 3.5 T en fonction de la réglementation locale.

7 - HRA : « Hot Rolled Asphalt », technique d'enrobés bitumineux mis au point en Angleterre après la première guerre mondiale. Ce type de formule se caractérise par une forte teneur en liant, une formulation discontinue ainsi qu'une teneur élevée en sable et en filler. Elle est particulièrement étanche, résistante à la fatigue et facile à mettre en œuvre.

8 - SMA : « Stone Mastic Asphalt », technique d'enrobés bitumineux développée en Allemagne dans les années 60 et qui s'est répandue en Europe, aux Etats-Unis et au Canada. La technique repose sur un squelette granulaire exempt de sable et sur un taux élevé de liant bitumineux. En France, la technique courante correspondante peut être un BBSG (Béton Bitumineux Semi Grenu) ou un BBTM (Béton Bitumineux Très Mince).

9 - Les formules Steelflow et Ultragrip sont des marques commerciales. Leur épaisseur de mise en œuvre (1,5 cm pour le Steelflow et 2,5 cm pour l'Ultragrip) ainsi que leurs propriétés (phonique pour le Steelflow) permettent de les rattacher à la famille des BBTM et de les comparer à des courbes de référence.

Les inspections des sections ont été effectuées avant la réalisation des mesures de rugosité, conformément au système de la grille d'évaluation du TRL (Nicholls, 1997), mais avec seulement deux inspecteurs. Il convient de préciser que pour rester objectif, il n'a été fait aucune distinction entre les défauts perçus du matériau et les autres imperfections liées aux sous-couches de chaussée ou à la mise en œuvre. Cependant, certains commentaires soulignant ces problèmes figurent dans le rapport initial.

La grille d'évaluation utilise une échelle à 7 niveaux, classés de mauvais à excellent pour évaluer l'état de service de la surface étudiée. (Tableau 2)

NOTE		DESCRIPTION	
E	Excellent	Aucun défaut visible	En état de service
B	Bon	Aucun défaut significatif	
Mo	Moyen	Quelques défauts mais insuffisants pour occasionner des problèmes sérieux	
A	Acceptable	Plusieurs défauts, mais globalement acceptables	
D	Douteux	Serieusement défectieux mais en état de fonctionnement à court terme	Pas en état de service
Me	Médiocre	Nécessite des réparations	
Ma	Mauvais	Nécessite des réparations immédiates	

Tableau 2
Echelle à 7 niveaux pour l'inspection des sites

Durabilité

Le système de la grille d'évaluation du TRL a été utilisé dans le passé pour évaluer la durabilité de couches de roulement de faible épaisseur, dans le cadre d'une étude sur 9 ans qui a permis de dégager de grandes tendances en terme de performances au cours du temps.

Concernant les surfaces HRA, une surveillance approfondie a été effectuée sur des sites tests au Royaume-Uni, où différentes tendances en matière de durabilité des formules de faible stabilité (FS), moyenne stabilité (MS) et forte stabilité (FS) ont été mises en œuvre.
Cependant, le HRA sur la section expérimentale au Royaume-Uni résultait d'un mélange à faible teneur en gravillons pré-enrobés et, en tant que tel, n'est pas directement comparable aux mélanges HRA à moyenne ou forte teneur en gravillons sans pré-enrobage qui font l'objet de cette étude.

Les résultats des inspections actuelles ont été matérialisés sur les graphiques suivants conjointement avec les courbes caractéristiques de référence pour chacune des principales catégories de revêtement (Figures 1, 2 et 3).

Les résultats montrent que, à trois exceptions près, les sections inspectées se situent au dessus des courbes de référence et ont donc une durabilité supérieure à la moyenne. Les exceptions concernent le SMA 14 (section 15) et les deux sections en HRA (sections 1 et 17) où l'état du revêtement fut jugé légèrement en dessous de la courbe de référence.
Cependant, comme indiqué précédemment, les seules courbes de performance disponibles pour le HRA concernaient des HRA à faible teneur en gravillons. Formulés avec une plus grande proportion de mastic[10], ceux-ci devraient présenter une tenue dans le temps supérieure.

10 - Mélange de bitume avec un filler d'origine minérale

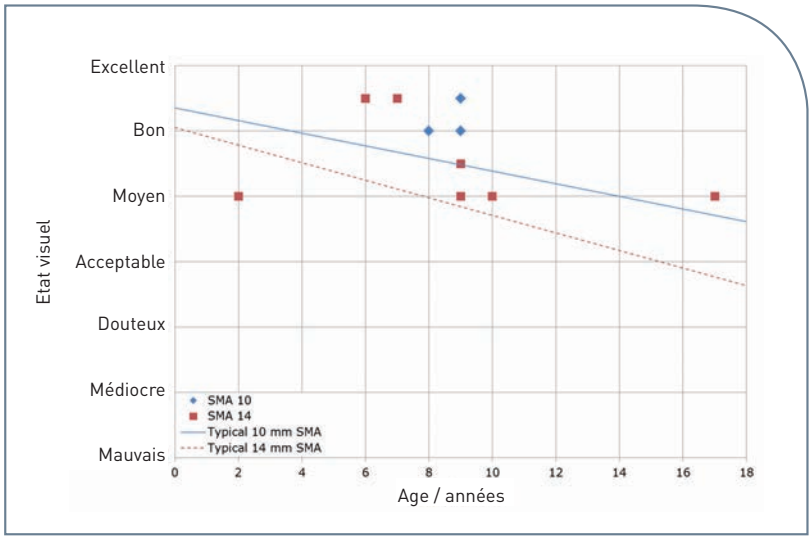


Figure 1
Etat visuel des sections inspectées par rapport aux courbes de référence concernant les mélanges SMA types

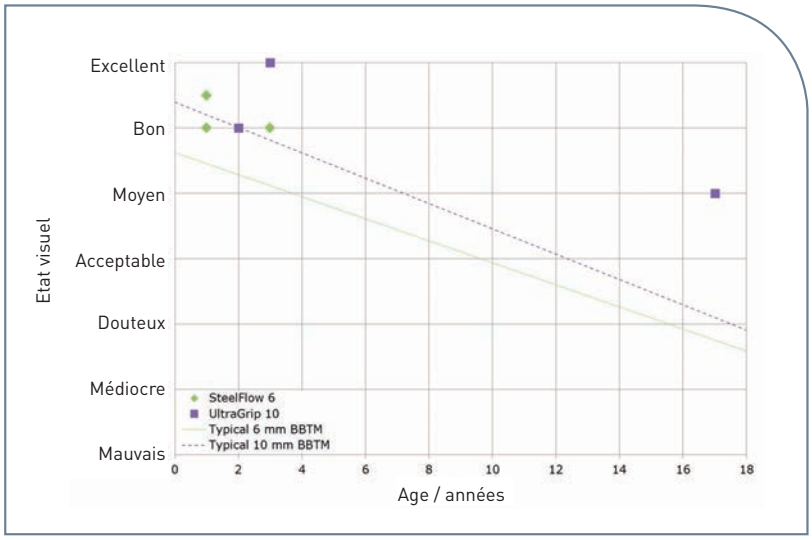


Figure 2
Etat visuel des sections inspectées par rapport aux courbes de référence concernant les mélanges BBTM[11]

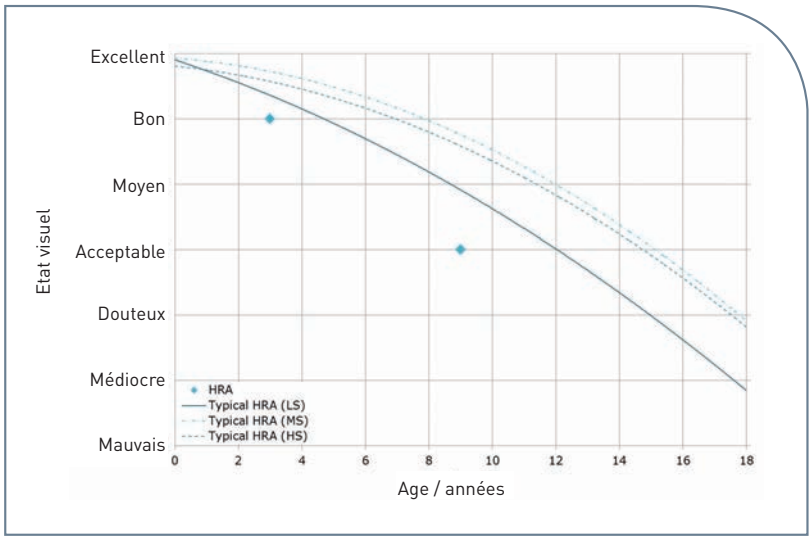


Figure 3
Etat visuel des sections inspectées par rapport aux courbes de référence concernant les mélanges HRA à faible teneur en gravillons

11 - BBTM : Béton Bitumineux Très Mince, Formule de béton bitumineux de granulométrie 0/6 ou 0/10 se mettant en œuvre sur des épaisseurs allant de 1,5 à 3 cm. Apprécié pour sa durabilité et pour ses propriétés acoustiques, et bénéficiant d'un bel uni.

Mesure de l'état de surface : rugosité et adhérence

Trois campagnes d'observation ont été menées, en juin, août et octobre 2014. Le TRL a utilisé une machine d'analyse systématique du coefficient de frottement transversal (SCRIM – Sideway-force Coefficient Routine Investigation Machine) pour effectuer les mesures. Les résultats ont été intégrés pour déterminer un coefficient SCRIM[12] estival moyen (MSCC[13] – Mean Summer SCRIM Coefficient) pour chaque section, fournissant ainsi une évaluation plus fiable que celle d'un relevé ponctuel.

Catégories de sections et définition		Niveau d'épreuve (ILs) à 50km/h							
		0.30	0.35	0.40	0.45	0.50	0.55	0.60	0.65
A	Autoroutes								
B	Double-voies sans intersection (croisement, jonction…)								
C	Simples voies sans intersection								
Q	En approche de croisements plus ou moins importants ou de rond-points								
K	En approche de passages piétons et autres situations à haut risque								
R	Rond-point								
G1	Gradient 5-10% supérieur à 50 m								
G2	Gradient >10% supérieur à 50 m								
S1	Rayon de virage <500m - double voie								
S2	Rayon de virage <500m - simple voie								

Tableau 3
Niveau d'épreuve (IL) pour différentes catégories de sections (d'après la réglementation HD28)

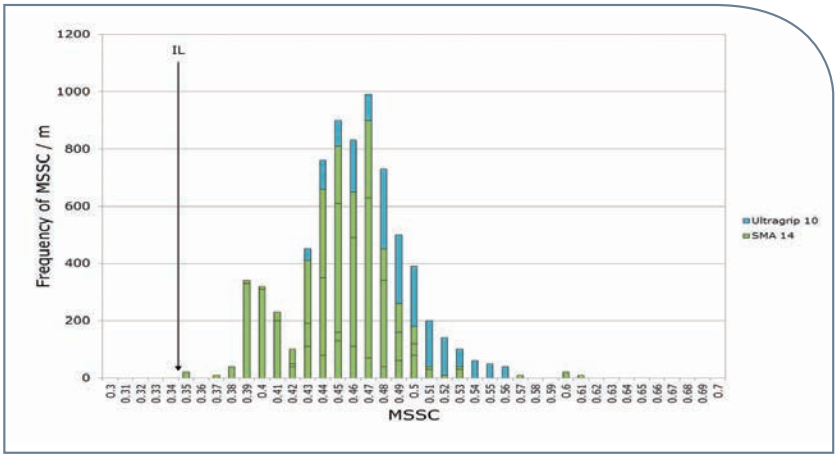


Figure 4
MSSC pour tous les sections par type de formule pour la catégorie de sites B

Les exigences en matière d'adhérence varient d'une section à l'autre, selon la géométrie de la route et du risque routier. Au Royaume-Uni, chaque section routière se voit attribuer une «catégorie» suivant la réglementation HD28 (Highways Agency, Transport Scotland, Welsh Assembly Government, Department for Regional Development Northern Ireland, 2004). Ces catégories sont répertoriées dans le tableau 3. En plus de ces différentes catégories, il existe, pour certaines d'entre elles, différents niveaux d'épreuve (IL). Ceux-ci correspondent au niveau d'adhérence selon lequel la section devrait être évaluée, si les résultats sont insuffisants.

Une fois la catégorie de section sélectionnée, le niveau d'épreuve (IL) approprié est attribué parmi les intervalles disponibles, selon une procédure décrite dans les directives. Différents niveaux IL peuvent être attribués à des sections relevant de la même catégorie,en particulier pour les sections où les risques de dérapage sont potentiellement plus élevés. Sur les figures 4 à 8, le niveau IL minimum pour une sélection de catégories a été mis en évidence, mais les performances des produits en regard des intervalles de niveaux IL est sujet à discussion.

La figure 4 présente les longueurs des sections de catégorie B (chaussées à 2 fois 2 voies séparées sans intersection) réalisées selon différentes formules et leur niveau de performances en terme de MSCC. Le niveau IL est connu pour cette catégorie de chaussées et il est évident que toutes les sections ont un niveau de performance supérieur à ce niveau IL.

12 - SCRIM : « système de mesure dynamique du coefficient de frottement transversal » dont le résultat donne un coefficient d'adhérence / rugosité. Il s'agit d'un système de mesure embarqué sur véhicule sensé déterminer l'état de surface de la chaussée en terme de rugosité / macro texture. On utilise en France plus généralement l'acronyme CFT (Coefficient de Frottement Transversal).

13 - MSSC : coefficient SCRIM (cf ci-dessus) moyen mesuré en période estivale pendant laquelle la rugosité de surface est supposée être la plus faible, donc en scénario défavorable. Initialement connu sous le nom NZMSSC, New Zealand Mean Summer Scrim Coefficient.

Cependant, comme il existe une relation inverse entre le niveau de rugosité et la classe de trafic, la figure 5 présente les mêmes données subdivisées par classe de trafic plutôt que par type de formule. Toutes les sections testées atteignent un niveau de performance supérieur au niveau IL minimum, démontrant ainsi que les enrobés à base de laitiers d'aciérie peuvent offrir un bon niveau de rugosité sur des chaussées à 2x2 voies, même avec des classes de trafic très élevées.

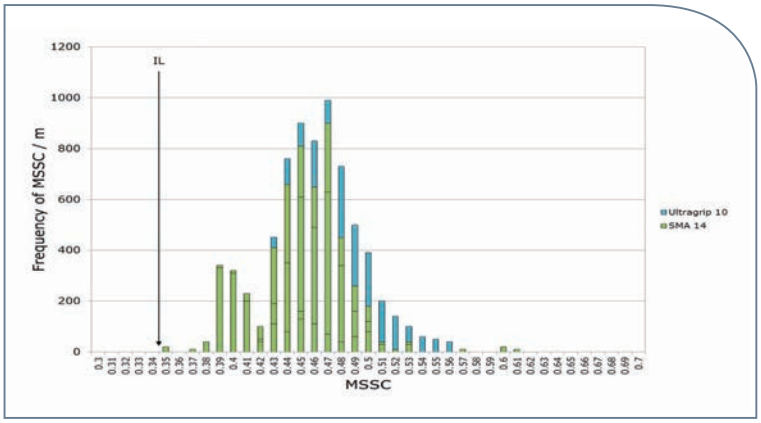
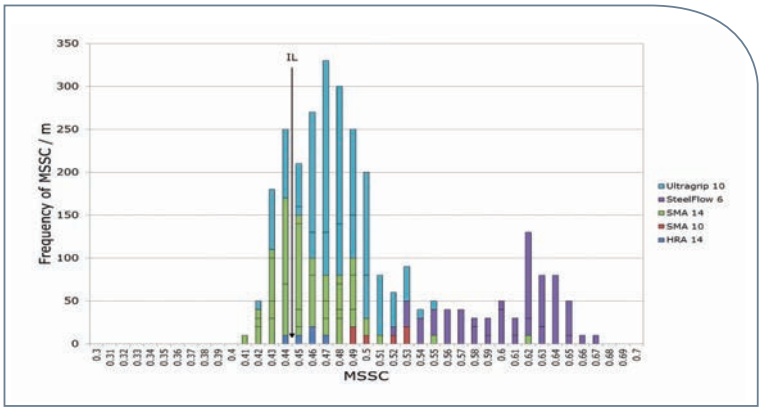
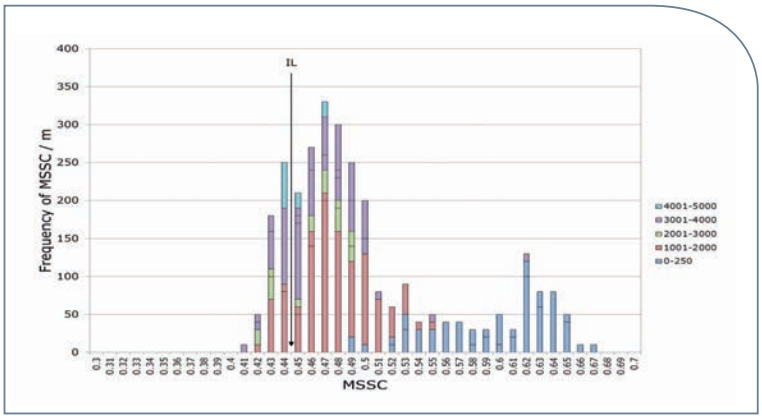


Figure 5
MSSC pour toutes les sections par classe de trafic pour la catégorie de sites B

Concernant la catégorie de sites Q (en approche d'intersections principales et secondaires, ronds points…), la longueur de chaussée testée étant relativement courte, on dispose de moins d'informations. Cependant les figures 6 et 7 présentent la répartition pour 6 formules différentes dans de telles conditions d'utilisation et pour des classes de trafic variables. On peut constater que la plupart des formules ont des niveaux de performance supérieurs au niveau IL de référence et que le produit Steelflow 6 en particulier présente des valeurs exceptionnellement élevées, bien que ce produit ait été mis en œuvre sur des chaussées à faible trafic.





Figures 6 et 7
MSSC pour toutes les sections par type de formule pour la catégorie de sites Q.

MSSC pour toutes les sections par classe de trafic pour la catégorie de sites Q.

Les données sont limitées concernant les formules testées à la fois sur les ronds-points et les courbes (sites R) en raison des faibles surfaces de revêtement, du nombre réduit de formules et des faibles niveaux de trafic. La figure 8 montre des résultats partagés : alors que le HRA en 14 mm affiche une performance de bon niveau sur les ronds-points, le SMA en 10 mm est moins performant en raison de davantage de sections en dessous du niveau IL de référence.

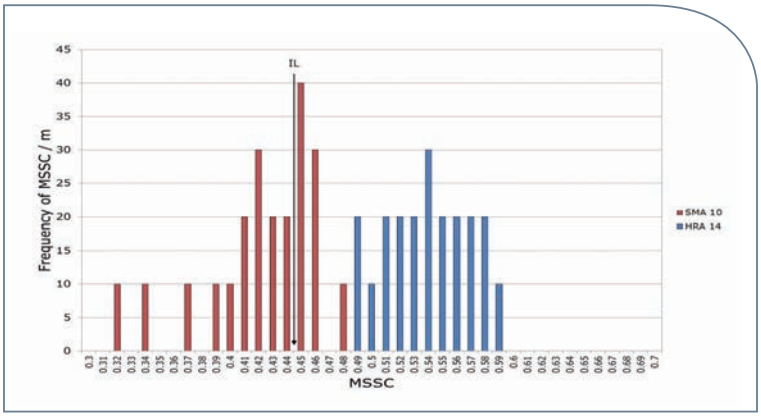


Figure 8
MSSC pour toutes les sections par type de formule pour la catégorie de sites R

Discussion et conclusions

Il a été démontré que la durabilité des produits Steelphalt, comme le démontrent les exemples de sections, est supérieure à la moyenne, à l'exception des deux formules roulées à chaud. Ces deux sites ont présenté une durabilité sensiblement moins bonne, mais la référence disponible en matière de durabilité pour ce type de matériaux concernait des mélanges de faible teneur en gravillons, alors que ces sites présentaient des mélanges à moyenne et forte teneur en gravillons avec moins de mastic. Il était donc impossible d'effectuer une comparaison directe.

En général, pour tous les produits testés, le score de rugosité se situe au dessus du niveau IL pour toutes les chaussées à 1 voie ou à 2x2 voies sans intersection, même quand la classe de trafic est très élevée.

Concernant les sections à haut risque, telles que les intersections ou les zones d'approche de giratoires et de courbes, la performance des différents produits est davantage partagée. Dans certains cas, le volume de données est insuffisant pour permettre de tirer une conclusion significative.

Cependant, il est incontestable que certains produits Steelphalt offrent une rugosité supérieure au niveau IL de référence sur des sections à haut risque, même avec des classes de trafic élevées. Par exemple, certaines sections en SMA 14 ont démontré leur capacité à bien se comporter sur des approches de jonction avec une classe de trafic supérieur à 5 000 véhicules par jour, et une section en HRA 14 a affiché une bonne performance sur un rond-point supportant plus de 5 000 véhicules par jour.

Il convient de noter que les scores de rugosité inférieurs au niveau IL de référence dans l'étude présentée ici, ne signifient pas nécessairement que la formule n'est pas appropriée. Un déficit en rugosité en regard du niveau IL pour une section donnée

devrait normalement déclencher une enquête visant à déterminer ou non si cela est susceptible d'augmenter le risque routier.

La formule SteelFlow a démontré une performance très prometteuse en offrant un score de rugosité supérieur, avec une marge importante, à chacun des niveaux IL de référence des sections sur lesquelles elle a été mise en œuvre. Cependant, en raison de la jeunesse de cet enrobé et du faible volume de circulation, des études complémentaires seront nécessaires pour évaluer sa performance dans la durée et sa capacité à supporter des charges supérieures.

En conclusion, les produits formulés à base de LAFE peuvent être utilisés en confiance sur des voies sans intersection et sur certains sections à haut risque sous réserve d'éléments justificatifs.

Le laboratoire britannique de recherche sur les transports (TRL) mène actuellement des tests complémentaires afin de collecter davantage de données sur différentes formules et dans différentes conditions de circulation afin d'identifier les formules les plus performantes pour les sections les plus à risque. L'évaluation du produit SteelFlow sous des classes de trafic plus élevées est au programme de ces investigations.

Références

Highways Agency, Transport Scotland, Welsh Assembly Government, Department for Regional Development Northern Ireland. (2004, August). Design Manual for Roads and Bridges. Volume 7 Section 3, HD28/04, Skid resistance. London: The Stationery Office.

Highways Agency, Transport Scotland, Welsh Assembly Government, Department for Regional Development Northern Ireland. (2012). Interim Advice Note 156/12. Revision of aggreagte specification for pavement surfacing. London: The Stationery Office.

Nicholls, J. C. (1998). The asphalt yearbook 1998. Results from the trial of modified rolled asphalts on the A38 Burton bypass. Institute of asphalt technology.

Nicholls, J. C., Carswell, I., Thomas, C., & Sexton, B. (2011). TRL674. Durability of thin asphalt surfacing systems. Part 4: Final report after nine years' monitoring. Crowthorne: TRL.

Roe, P. G. (2003). TRL566 Basic oxygen steel slag as surface course aggregate: An investigation of skid resistance. TRL Report TRL566. Crowthorne: TRL Ltd.

Dunford ,A, Nicholls, J. C , Viner, H. & Sanders P.D. TRL, Published Project Report PPR737. In-service performance of Steelphalt products.

Dans les précédents **NUMÉROS...**

N° 98 (octobre 2011)

• Le CTPL et la R&D :
Exemple du projet ANR eclair
Jérémie Domas : CTPL

• Les laitiers LD tiennent la route !
Impact environnemental : évaluation du comportement environnemental d'un laitier LD d'aciérie de conversion utilisé en construction routière.
Michel Legret : IFSTTAR, Institut français des sciences et technologies des transports, de l'aménagement et des réseaux Département Géotechnique, Eau et Risques

• Et si les vers de terre avaient leur mot à dire !
Evaluation écotoxicologique : analyse des effets sur les vers de terre de lixiviats issus d'un plot de laitiers LD.
Yvan Capowiez, Magali Rault, Christophe Mazzia : INRA Avignon

• Où sont passés les laitiers en 2010
Production et devenir des laitiers sidérurgiques en 2010 en France.
Jérémie Domas : CTPL

N° 99 (avril 2012)

• Bonne route avec les granulats de laitiers EAF !
Grèce : Utilisation de laitiers d'aciérie de four électrique en enrobé bitumineux en couche mince anti-dérapante.
Loannis Liapis : Civil Engineer, BEng, MSc, DIC, PhD Candidate, AEIFOROS SA
Spiraggelos Likoydis : Geologist, Director of P.Y.TH. Laboratory, EGNATIA ODOS SA

• Laitiers d'acierie de conversion : sélection à la source !
Sélection à la source des laitiers d'aciérie de conversion en vue de leur valorisation en technique routière
Julien Waligora : EIFFAGE Travaux Publics, Laboratoire Central Ciry
Michel Measson : EIFFAGE Travaux Publics, Direction Recherche et Développement
David Bulteel : Ecole des Mines de Douai

N° 100 (octobre 2012)

• Le CTPL, un peu d'histoire
CTPL : un organisme dédié aux laitiers sidérurgiques
Jacques Reynard : CTPL

• Des chiffres et des lettres (de noblesse) pour les laitiers
Evolution de la gestion des laitiers au cours des dix dernières années
Jérémie Domas : CTPL

• Valorisation des laitiers : cadre juridique
Etat des lieux juridique et statut des laitiers sidérurgiques
Jacques Reynard : CTPL• **Guide SETRA, à usage des maîtres d'œuvre et des maîtres d'ouvrage**

Le guide SETRA pour l'acceptabilité environnementale des laitiers sidérurgiques en technique routière
Jérémie Domas : CTPL

• Réalisations remarquables

• Les laitiers HF et d'aciérie : quel avenir pour les 20 prochaines années ?
Perspectives économiques, réglementaires et techniques quant à la valorisation des laitiers sur les 20 prochaines années.
Jean-Marie Delbecq : BSME

N° 101 (juillet 2013)

• Une valorisation en béton !
Valorisation en granulats pour béton des laitiers provenant de l'élaboration des aciers inoxydables en filière électrique
Gildas Adegoloye :
L2MGC, Université de Cergy-Pontoise
Anne-Lise Beaucour :
L2MGC, Université de Cergy-Pontoise
Sophie Ortola :
L2MGC, Université de Cergy-Pontoise
Albert Noumowe :
L2MGC, Université de Cergy-Pontoise

• Analyse du cycle de vie du laitier de haut-fourneau granulé moulu
Jacques Reynard : CTPL

• Des laitiers très protecteurs
Valorisation des laitiers LAFE comme granulats dans des blocs d'enrochement en béton
Benjamin Laclau : Nobatek
Bruno Bouquet : T.S.V.

N° 102 (juin 2014)

• Les produits laitiers, c'est bon pour la santé !
Evaluation des risques pour la santé humaine liés à l'utilisation des laitiers sidérurgiques en construction routière
Dr Deborah Proctor

• Des laitiers bons pour le service !
Evaluation des risques sanitaires liés à l'utilisation de laitiers de convertisseur
Laurent Butez : SGA

N° 103 (octobre 2014)

• Les LAC valorisés pour un retour à la source
Valorisation des laitiers d'aciérie de conversion : influence des conditions de refroidissement sur la nature et la taille des phases minérales
J. Poirier, G. Thévenin, C. Duée, C. Bourgel : CEMHTI, CNRS UPR3079/Université d'Orléans
M. Gautier : INSA de Lyon
D. Poirier : ArcelorMittal Maizières, Research and Development

• Que sont devenus les laitiers en 2013
Production et devenir des laitiers sidérurgiques en 2013 en France.
Jérémie Domas : CTPL

• Des laitiers à fort potentiel
Granulation à sec des laitiers de haut-fourneau avec récupération de chaleur
Ian J McDonald : Siemens VAI Métaux Technologies, Royaume Uni
Andrea Werner : Siemens VAI Métaux Technologies, Autriche

N° 104 (mai 2015)

• Avec les LAC, ça pousse !
Amendement des sols. Les laitiers sidérurgiques et leurs usages agricoles : un marché pérenne à fort potentiel.
Marc Fixaris : ArcelorMittal B.S.M.E

• Les laitiers au secours de l'agriculture !
Etats-Unis. Caractéristiques et apports des laitiers sidérurgiques en usages agricoles.
Mary Provance-Bowley : Harsco Metals and Minerals - Sarver, PA, USA

N° 105 (Octobre 2015)

Eaux en danger !
Les laitiers d'aciérie s'attaquent au phosphore
Chad PENN - Professeur Associé
Oklahoma State University -
Department of Plant and Soil Science

• Que sont devenus les laitiers en 2014
Production et devenir des laitiers sidérurgiques en 2014 en France
Jérémie Domas : CTPL

• Eaux usées :
Les laitiers démontrent leur efficacité
Florent Chazarenc - Ecole des Mines de Nantes
Marc Fixaris- Arcelormittal/BSME

N° 106 (Juin 2016)

• Expansion des laitiers d'aciérie :
à l'ouest, il y a du nouveau !
Utilisation des laitiers sidérurgiques en tant que matériaux granulaires : modèles prédictifs d'expansion volumique et critères d'exploitabilité
George WANG et Yuhong WANGA
Department of Construction Management, East Carolina University, Greenville, Etats-Unis
Zhili GAOB
Department of Construction Management and Engineering, North Dakota State University, Fargo, États-Unis

• Des laitiers qui ont du caractère !
Caractérisation de l'expansion des laitiers d'aciérie à l'autoclave
John J. Yzenas Jr.
Edward Levy Company, Dearborn, Michigan - Etats-Unis

LAITIERS
sidérurgiques

www.ctpl.info

Imprimé en France