

LAITIERS sidérurgiques

N°106

juin 2016

page 8

**Expansion des
laitiers d'aciérie :
à l'ouest, il y a du nouveau !**

page 6

Actualaitiers

page 24

Des laitiers

qui ont du caractère !



Présentation du test à l'autoclave récemment adopté par la National Slag Association (NSA) pour la caractérisation accélérée des laitiers d'aciérie.

CTPL

CENTRE TECHNIQUE
ET DE PROMOTION
DES LAITIERS SIDERURGIQUES

equity



Enfin !

Il arrive, de temps à autre, que dans un contexte plutôt morose, un évènement vienne éclaircir la grisaille ambiante. Là, pour le coup, s'est carrément le soleil qui est sorti de derrière les nuages ce 2 mars, date de la signature par le Ministère de l'Environnement du document reconnaissant aux laitiers de haut-fourneau granulés le statut de « non-déchet »... Bien qu'utilisé pour la première fois, ce statut devrait néanmoins permettre aux producteurs français d'affronter leurs concurrents européens à armes égales sur les marchés de l'export. Il reste donc au CTPL, avec le concours de ses interlocuteurs du MEDDE, à se pencher sur le cas des autres laitiers encore considérés comme « déchets ».

Cette démarche qui, nous n'en doutons pas, aboutira bientôt à la levée des freins psychologiques empêchant un usage banalisé des laitiers d'aciérie, va remettre au premier plan de nos préoccupations un sujet plus technique qu'environnemental ou juridique : l'expansion potentielle des laitiers de conversion et notre incapacité actuelle à la mesurer de façon satisfaisante.

Deuxième production française de laitiers en terme de tonnage, ceux-ci souffrent de l'absence d'une procédure de test capable de mesurer et de prévoir leur éventuelle expansion en conditions réelles d'utilisation. En effet, les solutions chimiques de stabilisation dimensionnelle existantes, bien qu'efficaces, rendraient le matériau moins compétitif. Cette situation se traduit, en particulier, par une interdiction d'usage dans la norme NF P11-213-1 pour les usages en terrassement sous bâtiment, par une note de

précaution dans la norme NF EN 12620 concernant les usages en granulats pour béton et par une réticence générale à leur usage en structure confinée.

Si le test normalisé européen de mesure de l'expansion volumique des laitiers (EN 1744-1), permet de caractériser le comportement du matériau sortant du site sidérurgique, il ne permet pas, en revanche, de caractériser celui du matériau effectivement mis en œuvre. Les freins administratifs et une suspicion environnementale infondée nuisibles à l'usage de ces laitiers ayant, jusqu'à ce jour, rendu difficile la justification du développement d'un nouveau test, la profession n'a pas engagé les études nécessaires.

L'Europe n'étant pas en pointe sur ce dossier, et considérant que ce problème devait également se poser sous d'autres cieux, il nous est apparu intéressant, une fois encore, d'aller voir ce qui se passait ailleurs, en particulier aux Etats-Unis. C'est donc le thème choisi pour ce numéro de Laitiers Sidérurgiques qui, nous l'espérons, déclenchera peut-être l'intérêt et l'émulation nécessaires au développement d'un nouvel outil de mesure de l'expansion volumique des laitiers d'aciérie de conversion susceptible de favoriser un usage plus étendu de ces laitiers et d'économiser des ressources naturelles de plus en plus précieuses.

Bonne lecture.

Jacques Reynard
Délégué Général du CTPL

page **6** **Actualaitiers**

page **8** **Expansion des laitiers d'aciérie :
à l'ouest, il y a du nouveau !**



Contrairement aux laitiers de haut-fourneau qui sont volumiquement stables et utilisables en construction routière, les laitiers d'aciérie contiennent de la chaux libre non hydratée en proportion variable qui peut occasionner leur expansion. Ainsi, afin d'envisager une exploitation maîtrisée de ces laitiers, il est indispensable d'en évaluer chaque type, selon son origine et les traitements qu'il a subi, afin de déterminer son éventuel potentiel d'expansion. Or aujourd'hui, aux USA, en l'absence de critères quantifiés permettant d'orienter les laitiers d'aciérie vers des usages appropriés, ceux-ci demeurent peu utilisés.

Cet article présente les résultats d'études réalisées aux Etats-Unis sur l'expansion volumique et sur les forces mises en jeu lors de ce phénomène afin d'élaborer des critères susceptibles de servir d'indicateurs pour l'utilisation de laitiers d'aciérie en tant que matériaux granulaires.

*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 !



Alors que les possibilités d'usage des laitiers d'aciérie sont multiples, ils demeurent encore un des matériaux les moins bien utilisés au monde. La question essentielle réside dans leur éventuelle expansion. D'où la nécessité de bien les caractériser pour pouvoir mieux les utiliser.

Si, en Europe, il n'existe pas de test normalisé permettant de caractériser le laitier d'aciérie sous sa forme effectivement mise en œuvre, aux Etats-Unis, différentes méthodes permettent d'évaluer l'aptitude de ces matériaux pour divers usages et de définir des seuils d'expansion critiques.

Cet article présente en particulier le test à l'autoclave récemment adopté par la National Slag Association (NSA) pour la caractérisation accélérée des laitiers d'aciérie.

*John J. Yzenas Jr.
Edward Levy Company, Dearborn, Michigan - Etats-Unis*

LAITIERS SIDERURGIQUES

70^{ème} année
Revue éditée et diffusée
gratuitement par le CTPL

Directeur de la publication

Jacques REYNARD,
Délégué Général

Rédacteur en chef

Jérémie DOMAS,
Directeur

Rédaction

CTPL
Immeuble Aristote
25, boulevard Victor Hugo
31770 Colomiers

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 :
Nucor, Phoenix Services

N° ISSN 1166 - 3138

Dépôt légal :
2^{ème} trimestre 2016

LE CTPL RECRUTE

son Directeur opérationnel

Tous les détails sur cette opportunité en page 29,
n'hésitez pas à postuler !

Fonctionnement du CTPL

Réunions de l'AG et du CA du CTPL

Les dernières réunions du CA et de l'Assemblée Générale (AG) se sont tenues le jeudi 28 avril dernier. L'occasion de présenter à nos Adhérents les actions techniques, réglementaires et normatives réalisées au cours de l'année 2015, ainsi que les prochaines échéances et les prévisions budgétaires pour l'année 2016.

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 18 mai 2016. L'occasion pour le CTPL de faire le point avec l'ensemble des acteurs de la profession des laitiers sur les problématiques normatives et réglementaires, et d'échanger sur les actions techniques en cours au sein des Etats Membres de l'UE. La prochaine réunion de l'Association européenne des producteurs et opérateurs des laitiers sidérurgiques, EUROSLAG, se tiendra à la fin du mois de novembre au FEhS à Duisbourg.

Conférence EUROSLAG

La 8^{ème} conférence EUROSLAG s'est déroulée du 21 au 23 octobre 2015 à Linz (Autriche). Organisée par la société Voestalpine, cette conférence a permis de faire partager les dernières expériences et les technologies innovatrices en termes de gestion des laitiers.

La prochaine conférence (9^{ème}) se tiendra cette fois à Metz au mois d'octobre 2017, sous l'égide de l'AFOCO.

En concurrence avec l'Université de Thessalonique (Grèce), c'est la qualité du dossier préparé par AFOCO qui a emporté la décision des administrateurs. Nous vous tiendrons au courant des modalités de cette conférence dans nos prochains numéros de notre revue Laitiers Sidérurgiques.

Conseil d'Administration d'EUROSLAG

Jacques Reynard a, de nouveau, été sollicité pour siéger au Conseil d'Administration d'EUROSLAG pour une durée de 3 ans. En accord avec Thomas REICHE, nouveau Directeur du FEhS, et Thomas MERKEL, nouveau Président de l'association, les travaux du Conseil vont, dans un premier temps, être essentiellement consacrés à une refonte du fonctionnement d'EUROSLAG :

- Définition des missions en coordination avec EUROFER,
- Examen des WG et de leur fonctionnement,
- Analyse des besoins (temps, expertise) éventuels d'un cadre permanent ou semi-permanent...

Réglementation nationale et européenne

Statut juridique des laitiers sidérurgiques

Le CTPL continue de suivre différents dossiers dans le cadre de la modification du statut juridique de déchet des laitiers sidérurgiques.

Ainsi, le MEDDE a reconnu à juste titre en mars dernier que « les laitiers de haut fourneau vitrifiés peuvent être considérés comme une substance et non plus comme un déchet ». Une première victoire pour la profession et pour les producteurs de laitiers granulés, qui sont enfin sur le même pied d'égalité que leurs homologues européens pour la commercialisation de leurs produits. En parallèle, un nouveau dossier de demande de sortie du statut de déchet, conforme à la nouvelle procédure instaurée fin 2015, est en cours de finalisation pour les autres typologies de laitiers utilisables en technique routière et usages assimilés. Ce dossier devrait être présenté prochainement à la Commission nationale Consultative pour la sortie du statut de déchet (CCSSD).

Les choses semblent donc bouger enfin pour les laitiers sur le chemin de l'économie circulaire !

Dossier d'enregistrement des laitiers sidérurgiques dans REACH

L'instruction de notre dossier de demande de sortie de statut de déchet par l'Administration française a mis en lumière la nécessité d'un certain nombre de précisions/clarifications à apporter au dossier d'en-

registrement des laitiers sidérurgiques dans REACH.

En effet, le « flou » qui préside à la rédaction actuelle du Rapport de Sécurité Chimique pourrait être préjudiciable à nos intérêts. Commencées en août 2015, les discussions entre les experts du RFSC et le CTPL ont finalement abouti à la prise en compte de toutes les demandes de modifications exprimées par ce dernier lors de la réunion dédiée du Working Committee du 16 février. Toutes les actions correctives ont été présentées et approuvées à l'unanimité lors de l'Assemblée Générale du RFSC qui s'est tenue à Düsseldorf le 10 mars.

Normalisation

CEN/TC 51 – Ciment et liants hydrauliques

La demande belge d'encadrement des laitiers pour des usages en traitement de sols a été simplement déboutée après réunion des présidents des CEN TC 51 et TC 227.

CEN/TC104 – Bétons

• Commission nationale « béton » - Groupe de travail P18B

Les travaux liés à la rédaction du projet de norme prNF 018-470 – Bétons Fibrés à Ultra hautes Performances – ont abouti à des contraintes sévères quant au choix des ciments pouvant être mis en œuvre. En effet, la teneur en laitier a été limitée à 20% alors que certains ouvrages français ont été réalisés avec des ciments présentant des teneurs en laitier bien supérieures. Le CTPL a évoqué cette problématique lors de la dernière réunion du 25 avril.

Les autres travaux concernent la durabilité des ouvrages ainsi que la révision des zones de gel/dégel en France.

• Groupe P18B/GE RE

Aucun progrès notable quant aux retours d'expérience attendus. Ceci n'est pas pour nous surprendre puisque les « expériences » dont il est question sont celles où les laitiers sont utilisés dans les conditions de la nouvelle norme béton française, c'est-à-dire avec des contraintes qui nous semblent clairement anti-concurrentielles.

• Groupe P18C – Constituants des bétons

Le problème de la validité des ATE européens relatifs aux produits d'additions pour les bétons a été affecté à ce groupe. Hélas, cela n'a toujours pas permis d'obtenir une position officielle française, le document européen attendu depuis 1 an n'ayant toujours pas été reçu...

CEN/TC154 – Granulats

Révision des normes européennes

La commission nationale du BN TRA Granulats travaille en 2016 sur 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. Une évolution notable des textes normatifs est attendue, mais pas avant la fin du second semestre 2017 !

Par ailleurs, le CTPL participe activement à la révision du fascicule de documentation FD P 18-662 (2005) qui fournit des recommandations sur les bonnes pratiques françaises en matière de performances attendues pour les granulats utilisés comme enrochements. Il décrypte plus particulièrement la lecture des normes européennes dans le domaine (NF EN 13383-1 et NF EN 13383-2), compte tenu de leur dernière mise à jour au niveau européen (version 2015).

WG13 – Substances dangereuses réglementées émises par les granulats

Le WG13 s'est réuni le 24 février 2016 à Londres à l'Association des Produits Minéraux (MPA), afin d'évoquer les conséquences normatives de la prise en compte des travaux du TC351. Ce groupe de travail a pour objectif d'anticiper la prise en compte de ces exigences pour les granulats et l'application pratique pour la Déclaration des Performances (DoP). Il est également en charge de déterminer la liste des substances dangereuses pertinentes à prendre en compte pour les granulats.

CEN/TC 260 – Engrais et amendements minéraux basiques

BN FERTI

• Commission Dénomination, Spécifications et Marquage

L'enquête publique sur le projet de norme européenne prEN 14069 :2015 - Amendements minéraux basiques - Dénominations, spécifications et étiquetage - s'est terminée le 21 mars. Ce document entérine l'usage des laitiers d'aciérie de conversion ainsi que des laitiers de poche des aciers faiblement alliés, pulvérisés ou simplement criblés, comme amendements minéraux basiques. Il est à notre opposition de la France à l'introduction de ces nouvelles substances.

• Commission Amendements Minéraux Basiques

Le projet de norme française prEN 44-001 :2015 est actuellement en enquête publique. La commission interministérielle qui devait trancher quant aux limites environnementales proposées a décidé d'incorporer, pour les laitiers de conversion, l'obligation suivante : CrVI < 4ppm. Bien que le marqueur retenu soit maintenant le CrVI, le test de référence demeure celui du Cr total.

Le CTPL a proposé des aménagements sur cette procédure et a également demandé de considérer les laitiers d'aciérie de conversion simplement criblés comme gisements d'amendements possibles ainsi que l'élargissement des granulométries autorisées.

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

WG1 – Emission dans l'eau

Depuis la dernière réunion du WG1 de janvier 2015, assez peu de faits nouveaux peuvent être signalés concernant l'élaboration de la procédure de détermination de l'émission de SDR vers les sols et les eaux pour les matériaux granulaires. Malgré l'opposition de la France sur le mode opératoire retenu, le texte a été repris conformément aux décisions de la dernière réunion du WG1 et sera mis à l'enquête du TC prochainement.

Cette procédure modifiée, manifestement incohérente et, selon le CTPL, infondée d'un point de vue scientifique, désavantage particulièrement la France eut égard à ses pratiques historiques de caractérisation environnementale. Seules les conclusions de l'enquête CEN et les résultats du programme expérimental de validation de cette méthode pourraient permettre de remettre en question ce qui ressemble à des « petits arrangements » entre certains experts européens...

Un rapport technique (TR) est également en cours de préparation par un groupe ad hoc du WG1 pour l'écotoxicité des Produits de Construction. Son application, réglementée en Allemagne, ne devrait pas être effective tant que ce document ne sera pas transformé sous forme de spécification technique (TS), voire validé en norme homologuée (EN).

WG3 – Radioactivité des Produits de Construction

En juin 2015, le 3^{ème} contrat couvrant les activités du CEN/TC351 a été signé, permettant ainsi au TG31 de lancer l'étude de robustesse pour le projet de norme TS 00351014 «Détermination des concentrations d'activité des radioéléments 226Ra, 232Th et 40K par spectrométrie de rayons gamma (γ) ».

Des progrès ont donc été réalisés sur le sujet au cours des six derniers mois, avec la tenue d'une réunion conjointe des TG31 et TG32, les 9 et 10 décembre 2015 en Pologne.

Une réunion plénière du WG3 s'est tenue, elle, le 19 avril 2016 à Copenhague afin de ratifier les avancées techniques des TG31 et TG32, et de définir les prochaines échéances, en particulier concernant la publication des documents normatifs attendus (Spécification technique (TS) mesure, et rapport technique (TR) dose).

Communication

Valorisation des matériaux alternatifs : les « CoTITA » assurent la diffusion

Après le succès des trois journées COTITA tenues au second trimestre de 2015 à Aix-en-Provence, Clermont-Ferrand et Paris, le CEREMA de l'Est lancera en 2016 également l'organisation d'une journée COTITA, afin d'assurer la promotion des outils mis en œuvre pour la valorisation des matériaux alternatifs en technique routière.

La confirmation de la date et du lieu précis restent encore à définir. Suivez en ligne sur notre site internet (www.ctpl.info) les informations relatives à la tenue de cet événement.

Une occasion supplémentaire pour le CTPL de promouvoir les performances techniques et environnementales des laitiers sidérurgiques, et les engagements pris par la profession.

Expansion

des laitiers d'aciérie : à l'ouest, il y a du nouveau !



Contrairement aux laitiers de haut fourneau qui sont volumiquement stables et utilisables en construction routière, les laitiers d'aciérie contiennent de la chaux libre non hydratée en proportion variable qui peut occasionner leur expansion. Ainsi, pour pouvoir envisager une exploitation maîtrisée de ces laitiers, il est indispensable d'en évaluer chaque type, selon son origine et les traitements qu'il a subi, afin de déterminer son éventuel potentiel d'expansion.

Or aujourd'hui, aux USA, en l'absence de critères quantifiés permettant d'orienter les laitiers d'aciérie vers des usages appropriés, ceux-ci demeurent peu utilisés.

Cet article présente les résultats d'études réalisées aux Etats-Unis sur l'expansion volumique des laitiers d'aciérie visant à élaborer des critères susceptibles de servir d'indicateurs pour l'utilisation de ces laitiers en tant que matériaux granulaires.

NB : Article extrait de la publication de G. Wang dans Journal of Hazardous Materials 2010 (Elsevier)

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

Utilisation des laitiers sidérurgiques en tant que matériaux granulaires : modèles prédictifs d'expansion volumique et critères d'exploitabilité

L'équation théorique visant à prédire l'expansion volumique des laitiers d'aciérie est tirée de l'observation des transformations physiques et chimiques subies, durant le processus d'hydratation, par la chaux libre qui s'y trouve contenue. Des tests d'expansion volumique menés en laboratoire permettent de comparer les résultats de mesures expérimentales à ceux extrapolés de la modélisation. Il s'avère qu'ils peuvent être étroitement corrélés. Il est, en outre, démontré expérimentalement qu'une certaine partie de l'expansion volumique des laitiers peut être absorbée par les espaces interstitiels existant dans des laitiers d'aciérie en vrac placés sous une charge extérieure ce qui annulerait ainsi l'augmentation de leur masse volumique apparente. Le volume interstitiel minimal (le plus faible) des laitiers est d'environ 7,5% et n'est pas lié à leur teneur en chaux libre. Un critère d'acceptabilité des laitiers considérés peut ainsi être élaboré à partir des caractéristiques d'expansion volumique (%) de ces laitiers et du volume minimal des vides pouvant l'absorber (%). Finalement, une relation est établie à partir de la teneur en chaux libre, ainsi que des densités réelle et apparente d'un échantillon spécifique de laitier d'aciérie. Les critères ou corrélations ainsi établis peuvent permettre d'orienter des laitiers d'aciérie acceptables vers des usages comme matériaux granulaires en construction routière*.

Introduction

Les laitiers sont des co-produits de fusion générés lors de différentes opérations sidérurgiques. Ils sont ensuite refroidis (cristallisés, bouletés, expansés ou granulés) en vue de leur utilisation ultérieure, ou plus rarement, de leur mise au rebut. L'utilisation généralisée des laitiers de haut-fourneau, issus de la sidérurgie, est relativement bien connue pour de nombreuses applications en construction routière, depuis leur emploi en couches de base, comme granulats pour bétons hydraulique ou d'asphalte à chaud, jusqu'à celui de liant hydraulique, ou encore d'additions pour béton. Contrairement aux laitiers de haut-fourneau, qui sont volumiquement stables et utilisables dans leurs applications pour la construction, les laitiers d'aciérie de conversion (LAC) et les laitiers d'aciérie de four électrique (LAFE) contiennent en proportions variables de la chaux libre non hydratée (CaO) pouvant causer une instabilité volumique (expansion) qui peut être traitée par un vieillissement artificiel du laitier, mesurée par des tests et des contrôles de qualité appropriés, afin d'assurer leur utilisation adéquate en construction. Chaque laitier doit être évalué de façon complète en termes de type, de traitement et d'origine, pour chaque utilisation envisagée, eu égard aux écarts significatifs de propriétés qui peuvent être sollicités et aux exigences particulières de performance pour les utilisations envisagées.

* Note des traducteurs : on peut également se référer à l'étude réalisée par le LCPC en 2004/2005 sur la formulation de mélanges stables contenant des laitiers d'aciérie expansifs.

Des études ont été menées par des spécialistes en sciences des matériaux et des ingénieurs en génie civil, afin d'offrir des débouchés à l'utilisation des laitiers d'aciérie pour des applications liées au secteur de la construction. Il a été observé que les laitiers d'aciérie pouvaient être utilisés dans de nombreux domaines de la construction comme, par exemple, dans la fabrication de ciments mélangés [1,2], en tant que matériaux granulaires dans les couches de base et les couches de fondation des routes [3–5], ou en tant que granulats dans les divers enrobés bitumeux ou couches de surface [6–8]. Bien que chaque type d'application puisse présenter des avantages spécifiques, l'utilisation des laitiers d'aciérie comme matériaux granulaires connaît un développement prometteur pour les raisons suivantes :

- (i) les laitiers d'aciérie peuvent être utilisés en beaucoup plus grandes quantités en tant que matériaux granulaires dans des couches non liées, telles que les couches de base et/ou de fondation des routes, comparativement aux d'autres usages ;
- (ii) les conditions d'utilisation des granulats sont techniquement éprouvées, simples et bien développées ;
- (iii) le problème de la stabilité à long terme est moins prégnant dans les couches non liées, comme les couches granulaires de base et/ou de fondation des routes, par exemple ;
- (iv) une méthode d'essai d'expansion volumique existe [9] ;
- (v) les industriels valorisant les laitiers d'aciérie ont axé leurs activités de production et de commercialisation sur les marchés de matériaux granulaires et les granulats destinés aux utilisations non confinées. La technologie relative au traitement et à la transformation des laitiers, qui a connu un développement important au cours des deux dernières décennies, a permis que celui-ci soit utilisé à grande échelle en tant que matériau pour les couches de base et les couches de fondation des routes [3,10,11].

Cependant, le fait est que le granulat obtenu à partir des laitiers d'aciérie n'a pas été largement utilisé dans la construction, notamment en tant que matériaux granulaires. En l'an 2000, aux États-Unis, près de 13 millions de tonnes de laitiers d'aciérie ont été générées, pour seulement 1,7 millions de tonnes utilisées dans la construction [12].

La principale raison expliquant ce faible niveau d'utilisation est le manque de critères quantifiés permettant d'orienter le laitier d'aciérie pour une utilisation adéquate dans un usage particulier. Il est donc impératif d'établir des critères pertinents au regard des utilisations possibles. Les traitements du laitier, les essais en laboratoire et la quantification des propriétés du laitier et du produit final (élaboration de critères) constituent la trilogie du développement de l'utilisation du laitier. Les différentes applications devraient être associées à des critères distincts permettant d'en optimiser l'utilisation. À titre d'illustration, la force d'expansion du laitier d'aciérie et la répartition de cette force dans des matrices hydrauliques rigides en régissent l'utilisation comme granulat dans les bétons ou autres matrices rigides, [13]. Il n'existe aucun critère unique gouvernant les diverses utilisations du laitier. Lorsque le laitier d'aciérie est utilisé en tant que matériau granulaire, dans la couche de base ou dans la couche de fondation des routes par exemple, l'expansion volumique apparente de la couche de base ou de la couche de fondation doit être limitée à zéro.

Néanmoins, un matériau granulaire en vrac présente des vides, et ce, même lorsqu'il est totalement compacté (valeur maximale de compactage obtenue par l'essai Proctor). Les vides existant dans un volume compacté de granulats de laitier d'aciérie en vrac peuvent-ils absorber l'expansion volumique générée par un laitier expansif ?

Pour répondre à cette question, les opérations suivantes doivent être effectuées :

- (i) détermination du taux théorique d'expansion volumique du laitier, taux qui peut être obtenu à partir des réactions chimiques observées dans les échantillons réagissant à l'humidité ;
- (ii) essai d'expansion volumique en laboratoire, avec et sans surcharge, à savoir la charge tridimensionnelle exercée autour de l'échantillon ;
- (iii) établissement de la relation existant entre la teneur en chaux libre et l'expansion théorique en présence d'une force de contrainte ; puis élaboration des critères d'acceptabilité.

Les critères devraient être fondés sur la relation existant entre l'équation d'expansion volumique estimée (exprimée en pourcentage et découlant des transformations chimiques et physiques de la chaux libre contenue dans le laitier) et le pourcentage minimum de vides interstitiels que peut venir combler l'expansion du laitier contraint par une certaine surcharge externe (poids de charge).

Propriétés de base du laitier

Compositions chimique et minérale

Les laitiers d'aciérie se présentent en blocs de forme alvéolaire ayant une certaine porosité. Ces laitiers sont essentiellement composés de CaO, MgO, SiO₂ et FeO. En cas de faible teneur en phosphore dans le cadre de la production d'acier, la concentration totale de ces oxydes dans des laitiers liquides est de l'ordre de 88 % à 92 %. Ainsi, le laitier peut être simplement représenté par un système quaternaire de type CaO-MgO-SiO₂-FeO. Mais les proportions respectives de ces oxydes et la concentration d'autres composants mineurs peuvent être variables et changer d'un lot à l'autre, y compris au sein d'une même usine, en fonction des matières premières utilisées, du type d'acier élaboré, des conditions du four, etc. Les compositions chimiques des laitiers issus des différents processus de production de l'acier ont été rapportées dans la littérature [2,14] et sont résumées dans le Tableau 1.

| COMPOSITION CHIMIQUE (%) | FeO | MnO | P ₂ O ₅ | SiO ₂ | CaO | Al ₂ O ₃ | MgO | TiO ₂ |
|--------------------------|-------|------|-------------------------------|------------------|-------|--------------------------------|------|------------------|
| Laitier LAC | 10-35 | 2-15 | 0.2-3.0 | 8-20 | 30-55 | 1-6 | 5-15 | 0.4-2 |
| Laitier LAFE * | 15-30 | 3-10 | 0.1-2.0 | 9-20 | 35-60 | 2-9 | 5-15 | |

Tableau 1

Composition chimique typique des laitiers d'aciérie

* Prise en compte des compositions chimiques des laitiers de four et des laitiers de métallurgie secondaire.

Les laitiers d'aciérie peuvent être refroidis à l'air ou trempés à l'eau. La majeure partie des industriels produisant des laitiers destinés à devenir des matériaux granulaires utilisent différents processus de refroidissement à l'air libre suivis par une séparation magnétique, un concassage et un criblage. Le laitier refroidi à l'air libre peut à la fois présenter de gros morceaux et une fraction granulaire plus fine.

La composition minérale du laitier refroidi est variable : elle est liée à son procédé d'obtention et à sa composition chimique. Le laitier refroidi à l'air libre est composé de $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$, $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ et de cristaux d'oxydes complexes de MgO, FeO et MnO (soit $\text{MgO}\cdot\text{MnO}\cdot\text{FeO}$) qui peuvent être notés plus simplement RO. Le CaO peut aussi intégrer cette phase RO. Par ailleurs, $2\text{CaO}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$, $\text{CaO}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$, $\text{CaO}\cdot\text{RO}\cdot\text{SiO}_2$, $3\text{CaO}\cdot\text{RO}\cdot 2\text{SiO}_2$, $7\text{CaO}\cdot\text{P}_2\text{O}_5\cdot 2\text{SiO}_2$ et d'autres oxydes peuvent aussi être contenus dans le laitier [2,15]. Il a été observé que les diagrammes de diffraction des rayons X sur ces laitiers sont proches de la cristallographie du clinker utilisé pour la fabrication du ciment Portland.

Mécanisme d'expansion

Durant le processus de fabrication de l'acier, des apports contenant de la chaux (CaO) ou de la chaux dolomitique (CaO, MgO), du fer et des scraps métalliques sont chargés dans le four. Une certaine quantité de chaux libre C (CaO) est contenue dans le laitier. Celle-ci présente une densité spécifique de 3,34, et peut réagir au contact de l'eau en produisant de la chaux éteinte ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) ayant une densité spécifique de 2,23, entraînant par là même une augmentation du volume. Ce phénomène est considéré comme la raison principale de l'expansion volumique du laitier [16].

Le MgO contenu dans le laitier d'aciérie se trouve sous forme de wustite, c'est-à-dire de Fe (Mn, Mg, Ca)O à l'état vitreux, de cristaux mixtes ou d'une solution solide composée principalement de FeO et de MnO annotée

RO. La forme minérale du MgO libre (périclase) est également volumiquement instable. Sa formation ne peut avoir lieu que dans des conditions de faible basicité. Compte tenu de l'état de basicité élevée du laitier en fusion et des faibles rayons de Mg^{++} , Fe^{++} et Mn^{++} (0,78, 0,83 et 0,91 Å), le MgO, le FeO et le MnO prennent généralement la forme de solutions solides, volumiquement stables. Dans cette étude, la chaux libre est donc considérée comme étant le principal facteur contributif de l'expansion volumique du laitier d'aciérie.

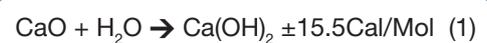
Expansion volumique théorique

L'augmentation de volume de la chaux libre du fait de son hydratation comprend deux aspects - un chimique et un physique -, qui peuvent être calculés. Néanmoins, l'aspect physique de l'augmentation de volume a été passé sous silence jusqu'ici. Dans la méthodologie suivante, les variations de volume dues tant aux phénomènes chimiques que physiques sont prises en compte.

Hydratation de la chaux libre et augmentation de son volume

La vitesse d'hydratation de la chaux libre dans le laitier est relativement lente par rapport à celle de la chaux vive, laquelle peut s'effectuer en l'espace de 30 min [17]. Cela est dû au fait que la structure de la chaux libre contenue dans le laitier présente une densité plus élevée, et ce en raison d'une température de calcination qui avoisine les 1700°C et d'une moindre capacité d'interaction de l'humidité avec la chaux libre.

La réaction de la chaux libre en présence d'eau peut être exprimée dans l'équation (1) :



A température ambiante, la réaction se produit vers la droite. Elle se produit vers la gauche à une température de 547°C ou plus [18].

| EQUATION DE LA RÉACTION | POIDS MOLÉCULAIRE | DENSITÉ SPÉCIFIQUE | VOLUME ABSOLU DU SYSTÈME (cm ³) | | VOLUME ABSOLU DE LA PHASE SOLIDE (cm ³) | | MODIFICATION DU VOLUME ABSOLU (%) | |
|---------------------------------|-------------------|--------------------|---|----------------|---|----------------|-----------------------------------|--------------|
| | | | AVANT RÉACTION | APRÈS RÉACTION | AVANT RÉACTION | APRÈS RÉACTION | SYSTÈME | PHASE SOLIDE |
| CaO + | 56.08 | 3.34 | | | | | | |
| H ₂ O | 18.02 | 1.00 | | | | | | |
| = | | | | | | | | |
| Ca(OH) ₂ | 74.10 | 2.23 | 34.81 | 33.23 | 16.79 | 33.23 | -4.54 | 97.92 |
| Eau nécessaire pour la réaction | | | 0.321 | | | | | |

Tableau 2

Modification du volume du système chaux libre/eau.

L'augmentation de volume, due à la réaction chimique s'opérant dans le système chaux/eau en phase solide (chaux) peut être calculée tel que présenté dans le Tableau 2.

Il ressort du Tableau 2 que le volume absolu en phase solide augmente de 97,92 %. En revanche, dans le système chaux/eau, le volume total n'augmente pas, il décroît même de 4,54 %. Cette réduction volumique d'origine chimique se produit lorsque la chaux réagit au contact de l'eau, conformément à ce que l'on observe avec d'autres matériaux cimentaires tels que le ciment Portland et le plâtre (retrait).

Expansion volumique due à la transformation physique

Les vides interstitiels entourant les particules de chaux libre peuvent être expliqués par la Figure 1. En cas d'hydratation, les espaces interstitiels augmentent avec le passage à la phase solide. Il est admis que les particules de chaux sont sphériques, tant avant qu'après l'hydratation, et qu'elles sont totalement compactées en adoptant une forme hexagonale idéale. Dans ces conditions, les solides occupent 74 % du volume total et les espaces interstitiels y représentent 26 %.

Les valeurs relatives à la proportion de vides sont constantes et ne sont pas dépendantes de la taille des particules. Cependant, la valeur absolue des vides interstitiels est variable en fonction des transformations en phase solide.

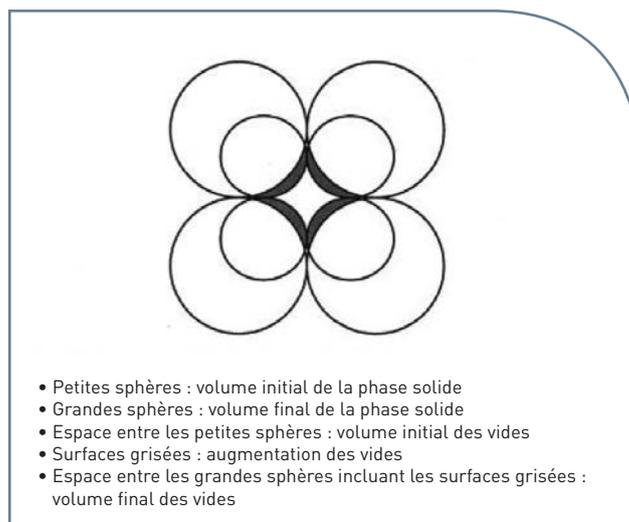


Figure 1

Effet de l'augmentation en phase solide sur les vides interstitiels.

Sur la figure 1, si les petites sphères absorbent à leur surface d'autres substances (durant leur hydratation, les particules de chaux absorbent des molécules d'eau, augmentant ainsi leur volume en phase solide), elles deviendront de grandes sphères bien que la proportion des sphères (solides) par rapport aux vides interstitiels ne change pas alors que le volume absolu augmente. Cela signifie que si le volume des sphères augmente de 1%, le volume des espaces vides augmentera, lui, de $26/74 \times 1\% = 0,351\%$. Dans le raisonnement ci-dessus, de très petites particules de chaux libre (d'une taille normalement inférieure à 100 μm) sont supposées prendre une forme sphérique. En raison de la taille minuscule de ces particules, l'augmentation de leur volume fait que le changement de forme physique ne contribue qu'à moins de 25 % à l'augmentation du volume total, ce qui est considéré comme étant acceptable dans l'équation de l'expansion volumique estimée.

Il ressort du Tableau 2 que, pour qu'une réaction puisse être complète, la phase solide devra augmenter de 97,92 %. Le vide augmentera donc proportionnellement de $26/74 \times 97,92\% = 34,40\%$.

Lorsque la chaux s'hydrate, l'augmentation de volume des particules en phase solide provoque une augmentation des espaces interstitiels, et l'augmentation combinée des volumes de la phase solide et des vides surpasse l'augmentation de volume du système chaux/eau, entraînant par-là même une augmentation du volume de la chaux. L'augmentation sera de $34,40\% + 97,92\% = 132,32\%$. L'expansion de la phase solide est supérieure à celle qui s'opère dans le seul système chaux/eau. Par conséquent, l'expansion volumique théorique réelle de la chaux libre contenue dans le laitier après réaction complète est de $132,32 - 4,54\% = 127,78\%$.

Une équation visant à prédire l'expansion volumique du laitier

Une équation permettant d'estimer l'expansion volumique potentielle du laitier peut être établie à partir du mécanisme d'expansion de la chaux libre.

Considérons un échantillon de granulats de laitier d'aciérie en vrac. Son volume total apparent est V_0 , le volume réel de particules solides est V et le ratio V/V_0 (ou γ_0/γ_1) est une mesure du ratio des densités apparente/spécifique du massif de laitier (exprimée comme D). L'expansion volumique est définie comme étant le rapport entre l'augmentation du volume et le volume réel (solide) du laitier, à savoir :

$$E_l = \Delta V/V \quad (2)$$

Formule dans laquelle, ΔV est l'augmentation de volume du laitier. Comme indiqué précédemment, l'augmentation de volume du laitier est uniquement due à l'augmentation de volume de la chaux libre qu'il contient. La masse du laitier est $V\gamma_1$, la masse de chaux libre est $V\gamma_1 C$ et le volume de chaux libre dans le laitier est $V\gamma_1 C/\gamma_c$. L'expansion volumique, E_l , du laitier d'aciérie peut s'exprimer comme :

$$E_l = \frac{1}{V_0 D} \times \frac{V_0 D \gamma_1 C}{\gamma_c} \times \frac{E_c}{100} \quad (3)$$

Dans cette formule, E_c représente l'expansion volumique de la chaux (%), totalisant 127,78 %, comme calculé ci-dessus ; E_l est l'expansion volumique du laitier (%) ; V_0 est le volume total apparent du laitier (cm^3) ; D est le ratio des densités apparente/spécifique du massif de laitier (γ_0/γ_1) ; C est la teneur en chaux libre du laitier (%) ; γ_0 est la densité apparente des échantillons de laitier en vrac et comportant des vides (g/cm^3) ; γ_1 est la densité spécifique du laitier (g/cm^3) ; γ_c est la densité compactée de la chaux (g/cm^3).

Remplaçons $\gamma_c = 3,34$ et $E_c = 127.78\%$ dans l'équation (3),

$$E_l = 0.38 \times \gamma_l C \quad (4)$$

De l'équation (4), il peut être déduit que l'expansion volumique du laitier est liée à sa densité compactée γ_l et à sa teneur en chaux libre C. Cependant, γ_l est une constante associée à un laitier particulier (g/cm^3). En conséquence, l'expansion volumique théorique d'un laitier est directement liée à sa teneur en chaux libre. Il est noté que 0,38 est exprimé dans une unité inverse de l'unité de γ_l .

Essai en laboratoire de l'expansion volumique

Méthode d'essai et équipements employés

Dans la formulation de l'équation (4), le volume réel V , à savoir V_oD , a été pris en compte. Néanmoins, lorsque le laitier est utilisé sous forme de granulats pour les couches de base et de fondation des routes, il doit être traité dans sa totalité. Au sein de ces couches, la compacité des grains n'est jamais totale et il reste toujours une part significative de porosité, ce qui signifie que le ratio des densités (apparente/spécifique) D n'est jamais égal à 100 %. Pour vérifier si la porosité d'un échantillon de laitier en vrac



Figure 2

Vue de l'équipement de mesure de l'expansion selon la norme ASTM D4792

peut absorber l'expansion volumique du matériau sans gonflement apparent de la structure, et pour contrôler également l'équation de prédiction de l'expansion, des essais d'expansion volumique ont été effectués sur des échantillons de laitier soumis et non soumis à la contrainte d'une surcharge.

La méthode d'essai ASTM D4792 a été adoptée pour les essais en laboratoire. Le diamètre du moule d'essai est de 15,24 cm, sa surface de 182,4 cm^2 et la hauteur destinée à recevoir les matériaux est de 12,8 cm. Des échantillons de laitier d'aciérie ont été testés dans le moule en exerçant, ou pas, une charge de 4 560 g (25 g/cm^2). Les échantillons de laitiers sont immergés dans un bain d'eau à $74 \pm 3^\circ\text{C}$. Les Figures 2 et 3 donnent une vue du déroulement du test d'expansion.



Figure 3

Essai d'expansion volumique en parallèle

Les échantillons ont été initialement choisis pour le test d'expansion afin de vérifier qualitativement si des différences d'expansion volumique existent. Deux tests ont été conduits en parallèle, avec et sans surcharge, pour chaque échantillon avec une granulométrie de 20mm (16/20mm).

Résultats des mesures

Trois échantillons de laitiers d'aciérie de conversion refroidis à l'air ont été préalablement sélectionnés à partir de différents gisements : LAC 1, LAC 2 et LAC 3. Les caractéristiques pertinentes de ces laitiers, ainsi que l'estimation théorique de leur expansion volumique respective dérivée de l'équation 4 sont présentés dans le Tableau 3.

Tableau 3

Caractéristiques des échantillons de laitiers d'aciérie choisis pour la comparaison aux essais d'expansion volumique

| | LAC 1 | LAC 2 | LAC 3 |
|--|-------|-------|-------|
| Teneur en chaux libre (C – CaO %) | 1.84 | 0.34 | 1.27 |
| Densité spécifique du laitier d'aciérie (γ , g/cm ³) | 2.980 | 3.075 | 3.16 |
| Expansion volumique estimée selon Eq. 4 (%) E_i | 2.08 | 0.39 | 1.52 |

Les résultats des tests d'expansion selon la méthode ASTM D4792, avec et sans surcharge, sont fournis dans le Tableau 4.

| JOURS D'ESSAI | LAITIER LAC 1 | | | LAITIER LAC 2 | | | LAITIER LAC 3 | | |
|---------------|-------------------------|----------------|--|-------------------------|----------------|--|-------------------------|----------------|--|
| | Expansion volumique (%) | | Différentiel d'expansion (% K_{25}) | Expansion volumique (%) | | Différentiel d'expansion (% K_{25}) | Expansion volumique (%) | | Différentiel d'expansion (% K_{25}) |
| | Avec surcharge | Sans surcharge | | Avec surcharge | Sans surcharge | | Avec surcharge | Sans surcharge | |
| 1 | 0.15 | 0.17 | 13.0 | 0.17 | 0.19 | 11.2 | 0.12 | 0.14 | 16.6 |
| 2 | 0.36 | 0.40 | 11.1 | 0.27 | 0.30 | 11.1 | 0.23 | 0.26 | 13.0 |
| 3 | 0.54 | 0.61 | 13.0 | 0.34 | 0.37 | 8.8 | 0.32 | 0.36 | 12.5 |
| 4 | 0.69 | 0.77 | 12.0 | 0.37 | 0.40 | 8.1 | 0.41 | 0.45 | 9.8 |
| 5 | 0.86 | 0.95 | 10.0 | 0.40 | 0.43 | 7.5 | 0.50 | 0.55 | 10.0 |
| 6 | 1.00 | 1.12 | 12.0 | 0.42 | 0.45 | 7.1 | 0.59 | 0.65 | 10.2 |
| 7 | 1.13 | 1.26 | 11.5 | 0.43 | 0.46 | 7.0 | 0.70 | 0.76 | 8.6 |
| 8 | 1.35 | 1.49 | 10.4 | | | | 0.81 | 0.89 | 9.9 |
| 9 | 1.48 | 1.64 | 10.8 | | | | 0.98 | 1.10 | 12.2 |
| 10 | 1.59 | 1.73 | 8.8 | | | | 1.17 | 1.26 | 7.7 |
| 11 | 1.71 | 1.83 | 7.0 | | | | 1.24 | 1.36 | 9.7 |
| 12 | 1.85 | 2.01 | 8.6 | | | | 1.30 | 1.41 | 8.5 |
| 13 | 1.95 | 2.13 | 9.0 | | | | 1.36 | 1.47 | 11.0 |
| 14 | 1.96 | 2.14 | 8.0 | | | | 1.41 | 1.53 | 8.5 |
| 15 | | | | | | | 1.42 | 1.54 | 8.5 |
| 16 | | | | | | | 1.44 | 1.55 | 7.6 |

Tableau 4

Résultats de l'essai d'expansion volumique (ASTM D4792), avec et sans surcharge

Compte tenu des résultats figurant dans les Tableaux 3 et 4, il en ressort que :

- (i) des différences d'expansion existent bien entre les échantillons surchargés ou non,
- (ii) ces différences, ou différentiels K25 (= sous 25 g/cm² de surcharge) varient entre 7 % et 13 %,
- (iii) les valeurs les plus basses apparaissent lorsque le taux d'expansion devient stable, c'est-à-dire vers la fin du test,
- (iv) l'équation prédictive 4 est relativement fiable pour estimer l'expansion majeure qui se développe durant les première et deuxième semaines d'hydratation. La Figure 4 montre les résultats d'expansion des trois échantillons avec et sans surcharge (7 % - 13 % de différences).

Ces différences, provoquées par la charge de 25 g/cm², sont essentielles pour l'élaboration du critère d'acceptabilité. Il convient toutefois de retenir les seuils inférieurs de ces différences comme critères d'acceptabilité, ce qui permet de rester conservateur.

Afin de vérifier quantitativement les différentiels les plus faibles, six échantillons de laitier d'aciérie (LAC), d'une granulométrie de 20 mm (16 à 20 mm), ont été sélectionnés pour subir 12 essais en parallèle avec et sans surcharge. Les densités (apparentes et spécifiques) et les teneurs respectives en chaux libre des échantillons de laitier sont reprises dans le Tableau 5.

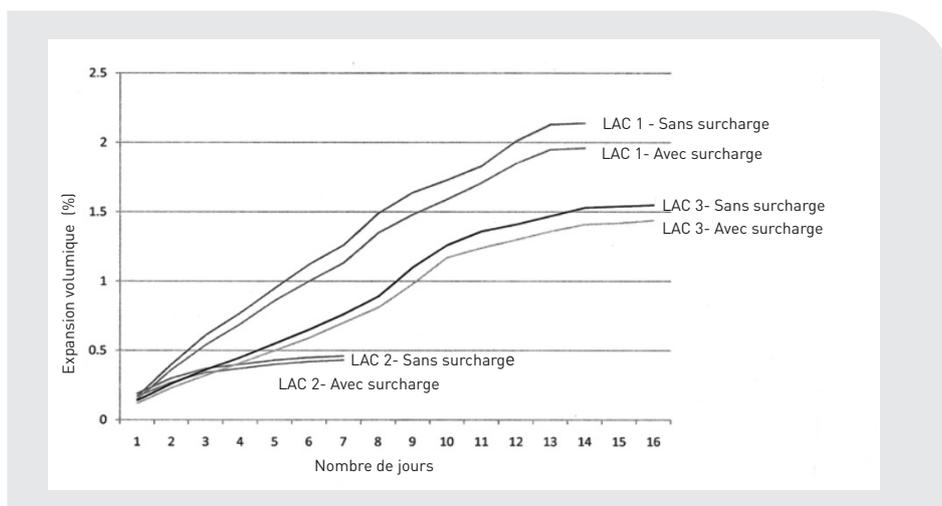


Figure 4
Résultats de l'expansion volumique pour les trois laitiers (LAC) testés avec et sans surcharge.

| NUMÉRO D'ÉCHANTILLON | LAC 2-1 | LAC 2-2 | LAC 2-3 | LAC 2-4 | LAC 2-5 | LAC 2-6 |
|--|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| γ_0 densité apparente (g/cm ³) | 2.346 | 2.278 | 2.149 | 2.307 | 2.189 | 2.243 |
| γ_1 densité spécifique (g/cm ³) | 3.361 | 3.271 | 2.886 | 3.189 | 2.990 | 3.261 |
| C (%) Teneur en chaux libre (CaO) | 2.7 | 3.5 | 3.3 | 3.1 | 2.4 | 3.4 |

Tableau 5
Densités (apparentes et spécifiques) et teneurs en chaux libre des échantillons de laitiers (LAC) testés

La méthode d'essai AASHTO T 85, portant sur la densité spécifique et la capacité d'absorption des gravillons a été utilisée pour la détermination de γ_o et de γ_I . La méthode d'analyse volumique a été employée pour déterminer la teneur en chaux libre. Les limites inférieures des différentiels après stabilisation de l'expansion volumique figurent dans le Tableau 6.

| NUMÉRO D'ÉCHANTILLON | EXPANSION VOLUMIQUE | | DIFFÉRENTIEL D'EXPANSION (% , K25) |
|----------------------|---------------------|----------------|------------------------------------|
| | AVEC SURCHARGE | SANS SURCHARGE | |
| LAC 2-1 | 1.85 | 2.01 | 8.6 |
| LAC 2-2 | 2.30 | 2.55 | 10.9 |
| LAC 2-3 | 0.56 | 0.62 | 10.7 |
| LAC 2-4 | 1.35 | 1.49 | 10.4 |
| LAC 2-5 | 1.95 | 2.10 | 7.7 |
| LAC 2-6 | 1.96 | 2.16 | 10.2 |

Tableau 6
Résultats de l'expansion volumique

Les résultats permettent de montrer que la valeur maximale d'expansion des laitiers testés est comprise entre 0,56 % et 2,55 % (Tableau 6). La comparaison de deux essais parallèles pour chacun des échantillons permet de constater que les valeurs d'expansion des échantillons des laitiers avec surcharge sont en moyenne inférieures de 7,7 % à 10,9 % par rapport à celles des échantillons sans surcharge. Cette différence est appelée « différentiel d'expansion » et est exprimée sous la forme K25 (25 g/cm² de surcharge).

Critères d'acceptabilité régissant la mise en œuvre des laitiers en tant que matériaux granulaires

Les essais d'expansion volumique permettent d'observer que les seuils de différentiels minimaux sous condition de charge sont de 7 % à 8 %. Cela signifie que si l'expansion estimée par l'équation (4) est inférieure de 7 % à 8 % au volume des vides estimé (un pourcentage de 7,5 % repris ci-dessous) et si le matériau supporte une charge de 25 g/cm², l'expansion volumique des laitiers ne se produira pas.

En d'autres termes, si

$$E_i < 7.5\% (1 - D) \quad (5)$$

ou

$$0.38 \times \gamma_i C < 7.5\% (1 - \gamma_0 / \gamma_i) \quad (6)$$

(avec une surcharge de 25 g/cm²)

il n'y aura pas d'expansion volumique apparente du massif granulaire. Dans l'équation (5), le changement de volume figure à gauche et est exprimé en (%); à droite figure le pourcentage de volume que peut occuper le laitier lors de son expansion.

L'équation (6) peut être ainsi réécrite :

$$C < \frac{0.075(\gamma_i - \gamma_0)}{0.38\gamma_i^2} \times 100\% \quad (7)$$

Cela signifie que si la teneur en chaux libre (C) des laitiers est inférieure à celle du terme figurant à droite de l'inéquation, les laitiers ne généreront pas d'expansion macroscopique, ou que l'expansion résultant de la présence de chaux libre sera «absorbée» par la porosité du mélange granulaire de laitier soumis à une pression de 25 g/cm². Autrement dit, on n'observera pas d'expansion globale de la structure si cette condition est réalisée.

Cela donne, de façon très simple, une estimation pratique du comportement d'un laitier donné présentant une teneur en chaux libre et des propriétés physiques connues. L'équation (7) a été développée expérimentalement pour le laitier d'aciérie sous réserve qu'il soit soumis à une pression de 25 g/cm² de la structure supérieure de la chaussée. La Figure 5 présente les couches de structure d'une chaussée recouverte, comprenant des couches d'asphalte mélangé à chaud, d'une épaisseur habituelle de 100 mm à 300 mm (4 à 12 in.) ainsi que des couches de base et de fondation granulaires.

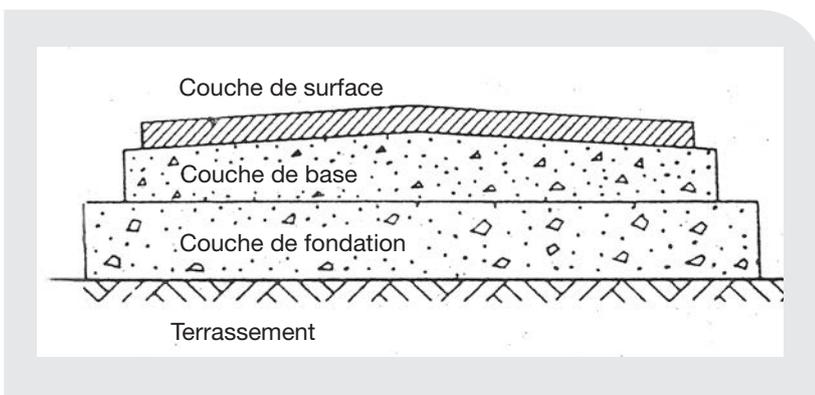
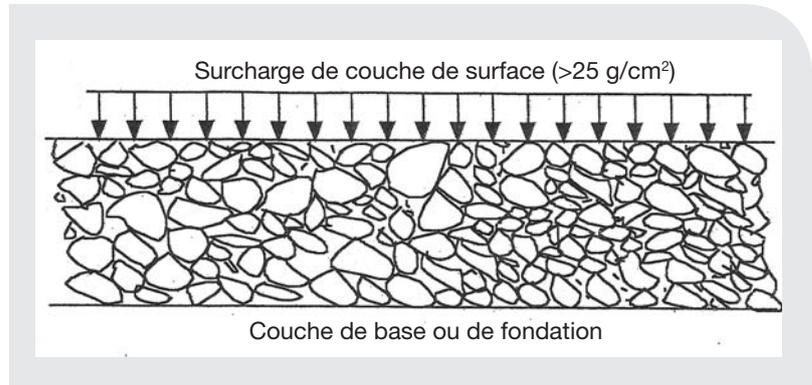


Figure 5
Vue de la structure de la chaussée

Figure 6

Couche de base ou de fondation de la chaussée en laitier d'aciérie, l'épaisseur de la couche de surface est en général supérieure à 10 cm (4 in.) conformément aux critères



La Figure 6 montre les couches de base et/ou de fondation granulaires soumises à la surcharge des couches d'asphalte mélangées à chaud. Il est considéré que l'épaisseur de ces dernières est supérieure à 10 cm (4 in.) et que la surcharge correspondante est supérieure à 25 g/cm².

Lorsque la chaux libre mesurée est > 4%, la teneur en chaux libre tolérée est :

$$C_{\text{tolérée}} < 2.8\% + \frac{K_{25}(\gamma_i - \gamma_o)}{0.38\gamma_i^2} \times 100\% \quad (9)$$

Modification du critère d'acceptabilité pour la mise en œuvre

Selon la littérature, il est admis que la teneur en chaux libre mesurée a deux origines : la chaux libre résiduelle et la chaux précipitée du laitier en fusion [15]. L'expansion volumique du laitier provient de la teneur en chaux libre résiduelle. Lorsque la chaux libre totale mesurée est inférieure à 4%, elle contient 2% de chaux précipitée ; lorsqu'elle est supérieure à 4%, elle en contient 2,8% [19]. Le critère final modifié peut donc être réécrit comme suit, en deux parties :

Lorsque la chaux libre mesurée est ≤ 4 %, la teneur en chaux libre tolérée est :

$$C_{\text{tolérée}} < 2.0\% + \frac{K_{25}(\gamma_i - \gamma_o)}{0.38\gamma_i^2} \times 100\% \quad (8)$$

Où $C_{\text{tolérée}}$ est la teneur maximum en chaux libre admissible pour un laitier donné dont l'emploi est envisagé comme matériaux granulaires, sous réserve qu'il soit mis en œuvre sous des couches de chaussée ayant une épaisseur supérieure à 10 cm, ou sous une surcharge permanente de 25 g/cm².

Discussion

Le dispositif d'essai avec surcharge est considéré comme une simulation du comportement de la couche de base ou de fondation d'une route réalisée avec des matériaux granulaires. La surcharge de 25 g/cm² est équivalente à une épaisseur minimum de 10 cm (4 in.) de la couche de roulement en béton hydraulique ou bitumineux, mise en œuvre par dessus la couche de base ou la couche de fondation en granulats de laitier d'aciérie. Il ressort des résultats de ces essais sur six échantillons, que les teneurs en chaux libre pouvant être tolérées ($C_{\text{tolérée}}$) pour une utilisation sécuritaire de matériau en tant que couche de base ou couche de fondation granulaires varient entre 3,7 % et 3,9 %, à condition que ces matériaux soient mis



Figure 7

Granulats de laitier d'aciérie produits sur le site Nucor de Cofiled (North Carolina)

en œuvre sous une charge permanente de 25 g/cm^2 , correspondant à une épaisseur de la couche de roulement de la chaussée supérieure à 10 cm.

La littérature fournit les niveaux limites de chaux libre pour l'utilisation des laitiers en tant que matériaux granulaires, telles qu'elles ont été fixées jusqu'à présent. Des informations reposant sur des retours d'expérience en construction routière suggèrent que la limite devrait être de l'ordre de 4 % [2,20]. D'autres documents proposent que cette limite de 4 % soit augmentée [21,22].

Néanmoins, il est observé que :

- (i) la recommandation ne provient que d'une observation visuelle sur le terrain ;
- (ii) les limites suggérées s'appliquent aux granulats de bétons hydrauliques ou bitumineux, et aux matériaux granulaires. Les critères d'acceptabilité ainsi élaborés peuvent être utilisés par les producteurs et les industriels valorisant les laitiers, afin d'évaluer l'utilisation potentielle de leurs produits pour la construction de routes et d'autoroutes.



Figure 8

Granulats de laitier d'aciérie produits sur le site Nucor de Cofiled, (North Carolina) mis en œuvre dans une couche de base avant couverture par une couche de béton d'asphalte

Conclusion

L'expansion volumique maximale du laitier d'aciérie peut être évaluée à partir de l'équation d'expansion théorique. Le calcul de l'expansion volumique, fondé sur la teneur en chaux libre, s'avère pratique et fiable dans le cadre d'une évaluation de l'utilisation d'un laitier particulier. Les expansions volumiques calculées peuvent aussi servir d'étalons de contrôle de la qualité durant le traitement d'un laitier ou de critères d'évaluation de laitiers dont l'usage est envisagé pour une ou plusieurs applications en travaux publics.

Les différentiels d'expansion volumique découlent à la fois de la porosité des structures granulaires et de la contrainte (charge) exercée par l'extérieur. En d'autres termes, un certain pourcentage de l'expansion volumique vient combler les vides de la structure granulaire et fait que l'ensemble de l'échantillon de laitier en vrac ne présente aucune expansion apparente. Le différentiel minimal et le plus pertinent pour l'élaboration des critères d'acceptabilité, se déroule au cours des derniers jours d'hydratation du test d'expansion. Il est d'environ 7 % et il n'est pas lié à la teneur en chaux libre. Pour les laitiers sidérurgiques, susceptibles de subir une expansion volumique lors d'une utilisation en tant que matériaux granulaires non compactés, l'expansion volumique apparente doit être prise en compte. Pour l'utilisation du laitier en tant que granulats liés dans une matrice rigide, un béton hydraulique par exemple, la force d'expansion, plutôt que le coefficient d'expansion volumique, devrait être utilisée pour pouvoir élaborer le critère d'acceptabilité.

Les critères ainsi élaborés peuvent servir d'indicateurs pour l'utilisation des laitiers en tant que matériaux granulaires.

Dans la plupart des cas, le coefficient d'expansion volumique des matériaux granulaires issus des laitiers est inférieur à celui des vides présents dans la structure. Cela est en partie dû à leur porosité et à leur structure alvéolée. D'autres travaux devraient être entrepris pour déterminer les relations existant entre les diverses caractéristiques physiques des granulats de laitier d'aciérie et les différentiels de volume associés, ou les différentiels associés à diverses surcharges.

Remerciements

Nos remerciements au Dr. Xinhua (Joy) He pour son aide dans la rédaction et l'illustration de cette étude.

Références

- [1] E. Tsakiridis, G.D. Papadimitriou, S. Tsvilis, et al., Utilization of steel slag for portland cement clinker production, *J. Hazard. Mater.* 152 (2) (2008) 805-811.
- [2] C. Shi, Steel slag—its production, processing, characteristics, and cementitious properties, *ASCE J. Mater. Civil Eng.* 16 (3) (2004) 230-236.
- [3] W. Shen, M. Zhou, W. Ma, et al., Investigation on the application steel slag-fly ash-phosphogypsum solidified material as road base material, *J. Hazard. Mater.* 164 (1) (2009) 99-104.
- [4] P. Suer, J. Lindqvist, M. Arm, et al., Reproducing ten years of road ageing-accelerated carbonation and leaching of EAF steel slag, *Sci. Total Environ.* 407 (2009) 511-518.
- [5] H. Motz, J. Geiseler, Products of steel slags an opportunity to save natural resources, *Waste Manage.* 21 (2001) 285-293.
- [6] P. Ahmedzade, B. Sengoz, Evaluation of steel slag coarse aggregate in hot mix asphalt, *J. Hazard. Mater.* 165 (2009) 300-305.
- [7] Y. Xue, S. Wu, H. Hou, et al., Experimental investigation of basic oxygen furnace slag used as aggregate in asphalt mixture, *J. Hazard. Mater.* B138 (2006) 261-268.
- [8] Y. Huang, R. Bird, O. Heidrich, A review of the use of recycled solid waste materials in asphalt pavements, *Resour. Conserv. Recy.* 52 (2007) 58-73.
- [9] American Society for Testing and Materials, Standard test method for potential expansion of aggregates from hydration reactions, ASTM D 4792-00, Reap-proved 2006.
- [10] G. Wang, J. Emery, Technology of slag utilization in highway construction, in: Annual Conference of Transportation Association of Canada, Quebec City, Quebec, 2004.
- [11] US Federal Environment Protection Agency, Use of Recycled Industrial Materials in Roadways, available at <http://www.epa.gov/osw/conservation/rrr/imr/pdfs/roadways.pdf> (accessed on April 30, 2010).
- [12] US Geological Survey, Industrial Solid Wastes, available at [http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/iron & steel slag/790400.pdf](http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/iron%20slag/790400.pdf) (accessed on April 12, 2010).

Des laitiers qui ont du caractère !

Alors que les possibilités d'usage des laitiers d'aciérie sont multiples, ils demeurent encore un des matériaux les moins bien utilisés au monde. La question essentielle réside dans leur éventuelle expansion. D'où la nécessité de bien les caractériser pour pouvoir mieux les utiliser.



Si, en Europe, il n'existe pas de test normalisé permettant de caractériser le laitier d'aciérie tel qu'effectivement mis en œuvre, aux États-Unis, différentes méthodes permettent d'évaluer l'aptitude de ces matériaux pour divers usages en déterminant des seuils d'expansion critiques. Cet article présente en particulier le test à l'autoclave récemment adopté par la National Slag Association (NSA) pour la caractérisation accélérée des laitiers d'aciérie.

John J. Yzenas Jr.
Edward Levy Company, Dearborn, Michigan - États-Unis

Enjeu

Les laitiers d'aciérie ont été déclarés «granulats de qualité supérieure» (*premium aggregate*) par la National Slag Association (USA) dans les années 90. Compte tenu de ses multiples possibilités d'usage, c'est potentiellement un des gisements de matériaux minéraux le moins bien utilisé du monde. Quand le matériau est correctement caractérisé et préparé, il peut être utilisé dans un champ d'applications très large, allant des granulats pour couches de fondation de chaussées jusqu'aux granulats pour béton comme en Espagne. Du fait de l'accroissement constant de la production mondiale d'acier, 1 062 541 tonnes en 2004 à 1 649 303 tonnes en 2013¹, la nécessité d'utiliser davantage de laitiers d'aciérie a également augmenté. De surcroît, la production d'acier est passée d'une production essentiellement en filière «intégrée» (hauts-fourneaux) à une production en filière «four électrique» (recyclage de ferrailles). Aux USA, la production en filière électrique est passée de 46% de la production totale en 2000 à 64% en 2009². Ces changements n'ont pas seulement augmenté le volume de laitiers d'aciérie disponibles, ils ont également conduit à des modifications de leur composition chimique du fait des changements de process de production et de leurs caractéristiques physiques liées aux modifications apportées aux méthodes de refroidissement et autres traitements mis en œuvre par les industriels. Il est essentiel que les producteurs/opérateurs de laitiers puissent déterminer à quelles applications leurs matériaux peuvent être adaptés, avant, pendant et après leur production.

Le verrou essentiel qui limite l'utilisation des laitiers d'aciérie est lié à leur instabilité volumique potentielle. Celle-ci peut se manifester de diverses façons, en théorie depuis l'expansion d'une structure de matériaux compactés, jusqu'à la désintégration des granulats.

Le choix d'une méthode de caractérisation adaptée est donc une décision critique. La caractérisation chimique n'est pas aussi simple du fait des variations de process et de la minéralogie, qui résulte des différentes procédures de refroidissement. La méthode la plus fiable est donc d'observer le comportement physique du laitier en mesurant sa stabilité volumique.

Méthode et seuils

Il existe actuellement plusieurs méthodes utilisées pour caractériser la stabilité volumique des laitiers d'aciérie. A l'origine, ces méthodes étaient utilisées pour évaluer l'aptitude des matériaux à des usages en sous-couches de chaussées. Les tests couramment utilisés tendent à privilégier trois différentes approches : court terme, conditions typiques d'emploi et long terme. La caractérisation est devenue encore plus critique si l'on envisage d'étendre les applications et les usages de ces matériaux dans des applications « confinées » telles que la protection de canalisations enterrées, remblais techniques et granulats pour béton. Dans la mesure où ces usages en milieux confinés sont assimilables à des applications de long terme, une approche conservatrice est de privilégier la méthode d'essai la plus sévère pour les caractériser.

L'utilisation de la procédure de test à l'autoclave (Photo 1) est ce qui se rapproche le plus des «pires scénarios», en couplant des conditions d'humidité, de température et de pression pour engendrer des réactions potentielles. Lors des premières comparaisons, la *National Slag Association (N.S.A.)* a considéré que « le test à l'autoclave était une méthode rapide et reproductible pour obtenir une mesure de l'expansion potentielle d'un laitier d'aciérie soumis à des conditions d'exposition sévères et très accélérées »³.

[1] World Steel Association – Wordsteel Committee en Economic Studies – Bruxelles 2014

[2] U.S. Geological Survey – Iron & Steel Statistics 2010

[3] National Slag Association – « Expansion Tests on Steel Slags » - Rapport final – Fév.1976



Figure 1
Equipement pour le test à l'autoclave

Suite à ces travaux et aux études actuellement menées à l'Université de l'Illinois, la N.S.A. a récemment adopté le test à l'autoclave comme procédure de référence pour la caractérisation accélérée des laitiers d'aciérie.

Dans la mesure où le test à l'autoclave conduit à des mesures d'expansion théorique élevées, des efforts ont été faits pour corrélérer ces résultats avec des spécifications dérivées à partir des diverses procédures de test par immersion dans l'eau. La spécification la plus courante⁴ en relation avec des critères d'acceptabilité relatifs à l'expansion volumique est la norme internationale ASTM D-2940, «*Standard Specification for Graded Aggregate Material for Base or Subbase for Asphalt Pavements and Runways*»⁵. Cette spécification fait référence à la méthode par immersion utilisée dans la norme ASTM D-4792 «*Standard Test Method for Potential Expansion of Aggregates from Hydraulic reaction*»⁶. Ce test autorise une expansion maximum de 0,5% pour rendre possible l'usage de matériaux en couches de fondation, lorsqu'ils sont testés par immersion (Photo 2).

Afin de corrélérer les résultats obtenus respectivement par le test par immersion dans de l'eau ASTM D-4792 et la méthode à l'autoclave, vingt échantillons ont été divisés et testés selon les deux procédures. Les résultats de ce programme sont rapportés dans la Figure 1. On doit toutefois noter que l'une des limites de la procédure par immersion est que, bien qu'elle permette de détecter l'expansion de la chaux (CaO), elle ne permet pas toujours de détecter l'expansion plus tardive de la périclase (MgO). En dépit du fait que la corrélation obtenue soit modeste ($r^2 = 0,55$) du fait des limites de la méthode par immersion, ce programme indique qu'une limite d'acceptabilité possible en relation avec les résultats du test à l'autoclave, et pour une utilisation en couche de base de chaussée, serait approximativement de 4,5% (correspond au 0,5% par immersion).

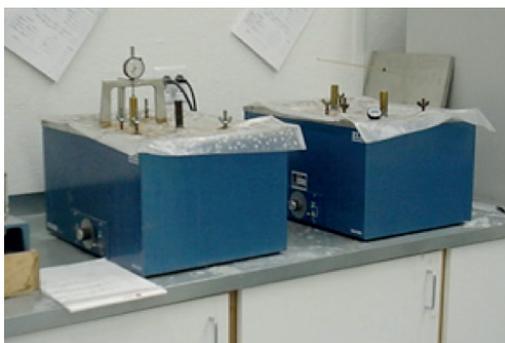


Figure 2
Test par immersion dans l'eau selon la norme ASTM D-4792

[4] Aux USA - NDT

[5] ASTM Book of Standards Vol. 04.43 – Road and Paving Materials

[6] Méthode de référence aux USA, également citée et utilisée dans l'article de G. Wang de ce numéro LS106.

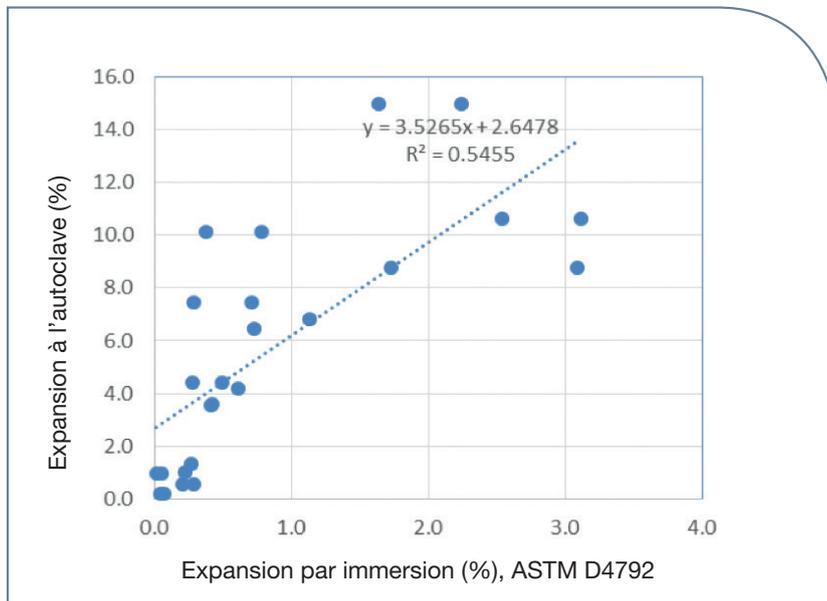


Figure 3
Corrélation entre les résultats des tests à l'autoclave (ordonnées) et par immersion (abscisses)

En partant de cette corrélation comme point de départ, la question qui se pose concerne les pourcentages d'expansion acceptables pour d'autres applications. En 2008, l'Etat de l'Indiana a envisagé l'emploi de laitier d'aciérie de four électrique dans les mélanges bitumineux en couches de fondation et couches de base de chaussées. Du fait que ces couches sont confinées, le problème de l'expansion/stabilité a été immédiatement envisagé. Sur la base de tests à l'autoclave, l'Etat, conjointement avec la société Edw. C. Levy, ont développé le test de désintégration ITM-219⁶ et l'ont appliqué aux gravillons (> 4,74 mm) pour bétons bitumineux. On a pu déterminer que lorsque la perte de masse (désintégration des grains) était inférieure à 4 %⁷, le laitier d'aciérie de four électrique pouvait être employé pour ces applications confinées.

Des travaux supplémentaires ont été menés par Roesler et Brand⁸, à l'Université de l'Illinois, afin d'approfondir l'usage de l'essai à l'autoclave pour la caractérisation des laitiers. Au cours de leurs travaux, ils

ont étudié le potentiel de réutilisation des granulats de laitiers d'aciérie issus de la démolition d'anciennes chaussées asphaltées provenant des environs de Chicago dans de nouveaux enrobés. Sur la base de leurs résultats, ils ont déterminé que les granulats de laitiers d'aciérie issus de la démolition de bétons bitumineux (SFS-Frap - Steel Furnace Slag - Fractionated Reclaimed Asphalt) pouvaient potentiellement être réutilisés en béton bitumineux sous réserve de déterminer leur teneur en chaux libre et leur potentiel d'expansion à l'autoclave avant de les réutiliser. Le taux d'expansion des gravillons de laitiers recyclés, déterminé à l'autoclave, est typiquement inférieur à 2%. A partir d'échantillons de laboratoires⁹ et de travaux menés en Espagne¹⁰, où jusqu'à 100% de granulats et de sables de laitiers EAF ont été utilisés en béton, et d'autres projets, on peut également supposer que des échantillons présentant des taux d'expansion à l'autoclave inférieurs à 2% peuvent être utilisés sans inconvénient pour la fabrication de bétons hydrauliques.

[6] ITM-219, Acceptance Procedures of Steel slag for Deleterious Materials

[7] Indiana Department of Transportation, Standard Specifications - 2014, Section 904.01

[8] Concrete with Steel Furnace Slag Fractionated Asphalt Pavement, Jeffrey Roesler, Ph.D., P.E., and Alexander Brand, University of Illinois, July 2014, Illinois Center for Transportation - Research Report ICT-14-015

[9] Correspondance personnelle de Edw. C. Levy Company

[10] Bâtiment Labein-Tecnalia Kubik à Madrid (Arribas et al. 2010)

A l'autre extrémité du spectre, les utilisations de laitiers d'aciérie en sous-couches de chaussée et pour la stabilisation de sols ont été largement documentés. Alors que dans nombre de cas, tels que ceux décrits par Yildirim et Prezzi¹¹ dans SPR-3129 ou P.-Y. Mahieux (et al)¹², les laitiers d'aciérie ont été utilisés avec un ajout de ciment ou de cendres volantes comme activant. Les laitiers d'aciérie ont également été utilisés sans activant comme produit de base, par exemple dans l'état de Pennsylvanie, ou pour le recyclage de couche de roulement. Dans ces cas-là, une réaction de «prise» est recherchée. Une littérature fournie indique qu'une teneur en chaux libre supérieure à 4% est alors nécessaire. Dans la mesure où la chaux libre est étroitement liée à l'expansion, on peut raisonnablement en déduire que des matériaux montrant un taux d'expansion à l'autoclave supérieurs à 5% seront adaptés à un usage hydraulique.

Précédemment, les travaux de caractérisa-

tion ont été menés dans le but de déterminer les critères «d'acceptation/de rejet» des laitiers. Si on regarde la quantité de travaux qui ont été menés pour les différents usages, et qu'on en fait une consolidation, on peut commencer à formuler un guide des règles d'usages pour la caractérisation des laitiers d'aciérie. Alors que, dans la plupart des cas, la décision finale quant à l'adéquation d'un laitier avec une application est faite juste avant la mise en œuvre, en tant que producteur/valorisateur, nous avons besoin réellement de déterminer bien plus tôt cette conformité. Lorsque l'autoclave est utilisé comme outil de contrôle dans un plan de management de la qualité des laitiers, il est possible de décider plus en amont quelles applications doivent être ciblées, préalablement à la commercialisation. Ceci peut aider dans l'optimisation de l'utilisation de la production totale en réduisant ou en éliminant les matériaux non conformes à l'usage souhaité. Le Tableau 1 donne une vue générale de ce à quoi un tel guide pourrait ressembler.

| LIMITES D'EXPANSION À L'AUTOCLAVE | USAGE | TYPE D'APPLICATION |
|-----------------------------------|--------------------------|---|
| 0 - 2% | Sans Restriction | Granulats de béton |
| 2 - 5% | Structures confinées | Bas-côtés de chaussées, parkings, voies d'accès temporaires |
| 5 - 10% | Structures Non Confinées | Routes Secondaires, surfaces non revêtues, stabilisation de sols. |
| 10+% | Sujet à restrictions | Stabilisation. Ne doit pas être utilisé en structures confinées ou lorsque la dégradation de l'ouvrage est problématique. |

Tableau 1
Guide d'application

Conclusion

Une caractérisation appropriée peut donc être un outil précieux dans le but de mieux utiliser les gisements de laitiers d'aciérie disponibles. Dans le but d'améliorer notre capacité à caractériser les laitiers d'aciérie, des travaux supplémentaires seront nécessaires si l'on souhaite mieux définir les limites d'expansion à l'autoclave et, sans doute, compléter cette boîte à outils. Le résultat final vise à aboutir à une réduction des non-conformités ou des rejets de matériaux, et donc à une baisse des coûts du matériau et des ouvrages.

[11] Utilisation de laitiers d'aciérie dans des applications en sous-couches de chaussées ; SPR-3129, FHWA/IN/JTRP-2009/32, Yildirim et Prezzi

[12] Utilisation de laitiers d'aciérie de conversion vieillis dans la production de liants hydrauliques routiers ; Elsevier 2009, P.-Y. Mahieux, J.-E. Aubert, G. Escadeillas

LE CTPL RECRUTE

Le CTPL (Centre Technique et de promotion des Laitiers sidérurgiques)
recrute son **Directeur opérationnel**.

MISSIONS

Vous prenez en main les dossiers concernant la réglementation liée aux différentes filières de valorisation de laitiers. Les sujets sont nombreux et couvrent tant les aspects juridiques, environnementaux que techniques pour des usages liés aux ouvrages de travaux publics, à l'industrie des liants hydrauliques ou encore aux fertilisants agricoles.

Vous assurez la veille réglementaire auprès des institutions nationales et européennes, et rédigez les synthèses pour les adhérents. Vous animez des réunions internes avec les adhérents, et participez aux travaux de suivi et d'anticipation réglementaires.

Force de proposition, et en étroite coordination avec le Délégué général, vous préparez la stratégie et les positions de la profession sur les domaines de votre compétence. Vous proposez les programmes de recherche nécessaires au développement des usages et en assurez le pilotage et la gestion des interfaces.

Vous assurez les relations avec les pouvoirs publics : groupes de travail relatifs à l'évolution de la réglementation, réponses aux consultations... Vous accompagnez les Adhérents dans leurs relations avec l'Administration.

Vous assurez les interfaces avec les organisations professionnelles nationales (AFNOR, AFOCO, IDRRIM...) et européennes (Eurofer, Euroslag).

Vous contribuez à la communication interne et externe sur les sujets de votre compétence (rapport annuel, revue semestrielle, le site web, les cycles de formation, etc.).

PROFIL

H/F – Universitaire ou ingénieur de formation, vous avez obligatoirement une expérience en matière de valorisation et d'usage de matières secondaires (la connaissance des laitiers serait un avantage) au sein d'une entreprise, d'un laboratoire ou d'un organisme professionnel. De culture et d'expression française, il est impératif d'avoir de bonnes capacités rédactionnelles et d'expression orale, ainsi qu'une aptitude réelle à analyser des textes réglementaires et d'excellentes qualités relationnelles.

Vous parlez et écrivez couramment l'anglais pour gérer vos interfaces à l'international.

POUR POSTULER

Envoyez CV et lettre de motivation à Jérémie DOMAS : jeremie.domas@ffa.fr
CTPL - Site ARCELORMITTAL de Fos - Aile 1 - Bureau 120 - 13776 Fos-sur-Mer cédex



Dans les précédents NUMÉROS...

N° 97 (avril 2011)

• Les laitiers d'aciérie électrique au secours des récifs coralliens

Egypte : utilisation de laitiers d'aciérie électrique comme substrats pour la régénération des récifs coralliens.

Nadia Habib : Coraliareef

• Techniques routières : les laitiers de convertisseur font désormais jeu égal avec les granulats naturels

Maîtrise de l'expansion des laitiers. Valorisation des laitiers d'aciérie de conversion en technique routière.

Thomas Muckensturm & Pierre Todaro : Eurogranulats

N° 98 (octobre 2011)

• Le CTPL et la R&D :

Exemple du projet ANR éclair

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 !

Évaluation 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.

*Ioannis Liapis : Civil Engineer, BEng, MSc, DIC, PhD Candidate, AEIFOROS SA
Spiraggelos Likoydis : Geologist, Director of P.Y.TH. Laboratory, EGNATIA ODOS SA*

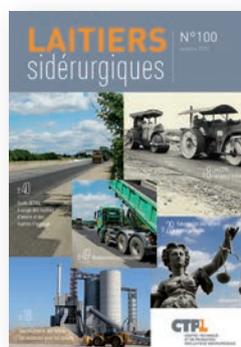
• Laitiers d'aciérie de conversion : sélection à la source !

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

Évolution de la gestion des laitiers au cours des dix dernières années

Jérémie Domas : CTPL

• Valorisation des laitiers : cadre juridique

État 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.

• Que sont devenus les laitiers en 2013

Production et devenir des laitiers sidérurgiques en 2013 en France.

Jérémy 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 Provan-Bowley :

Harsco Metals and Minerals - Sarver, PA, USA



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

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

Jérémy Domas : CTPL

• Eaux usées :

Les laitiers démontrent leur efficacité

Florent Chazarenc - Ecole des Mines de Nantes

Marc Fixaris - Arcelormittal/BSME



LAITIERS
sidérurgiques

www.ctpl.info