

LAITIERS sidérurgiques

N°106

avril 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 N.S.A. pour la caractérisation des laitiers d'aciérie.

CTPL

CENTRE TECHNIQUE
ET DE PROMOTION
DES LAITIERS SIDERURGQUES

Expansion

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



Contrairement aux laitiers de hauts fourneaux qui sont volumétriquement stables et faciles à utiliser en construction routière notamment, 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 instabilité volumétrique et son potentiel d'expansion.

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

Les Etats-Unis ont sur ce point une longueur d'avance.

Cet article présente les résultats d'études sur l'expansion volumétrique 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.

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 volumétrique et critères d'exploitabilité

L'équation théorique visant à prédire l'expansion volumétrique 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 volumétrique menés en laboratoire permettent de comparer les résultats de mesures expérimentales à ceux extrapolés de la modélisation. Il s'avère qu'ils sont étroitement corrélés. Il est, en outre, démontré expérimentalement qu'une certaine partie de l'expansion volumétrique des laitiers peut être absorbée par les espaces interstitiels existant dans des laitiers d'aciérie en vrac placés sous une surcharge extérieure et annulant 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'exploitabilité est élaboré à partir des caractéristiques d'expansion volumétrique des laitiers d'aciérie (%) 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 ainsi que d'autres scories non-ferreuses susceptibles d'expansion (cuivre ou nickel par exemple) vers des usages comme matériaux granulaires en construction routière.

Introduction

Les laitiers sont des co-produits de fusion générés lors de différentes opérations métallurgiques. Ils sont ensuite refroidis (cristallisés, bouletés, expansés ou granulés) en vue de leur utilisation ultérieure, ou hélas trop souvent, de leur mise au rebut. L'utilisation généralisée de laitiers de hauts fourneaux, issus de la sidérurgie, est relativement bien connue pour de nombreuses applications en construction routière, depuis leur emploi comme agrégats pour les couches de base, comme granulats pour béton hydraulique ou d'asphalte à chaud jusqu'à celui de liant hydraulique, ou encore d'addition pour béton. Contrairement aux laitiers de hauts fourneaux, qui sont volumétriquement stables et faciles à utiliser 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 volumétrique (expansion) qui devra 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 en termes de type, de traitement et d'origine, pris isolément, doit être évalué de façon complète pour chaque utilisation envisagée, eu égard aux écarts significatifs de propriétés qui peuvent être sollicitées et aux exigences particulières de performance pour les utilisations envisagées.

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 matériau granulaire dans les couches de base et les couches de fondation des routes [3-5], ou en tant qu'agrégat 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 matériau granulaire 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 à d'autres usages ;
- (ii) les conditions d'utilisation des granulats sont techniquement solides, 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 volumétrique existe [9] ;
- (v) l'industrie de transformation du laitier a longuement axé ses activités de production et de commercialisation sur les marchés de matériaux granulaires et les agrégats destinés aux utilisations non confinées. La technologie relative au traitement et à la transformation des laitiers, qui a connu un bon développement 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].

Mais le fait est que le granulats obtenu à partir des laitiers d'aciérie n'a pas été largement utilisé dans la construction, notamment en tant que matériau granulaire. En l'an 2000, aux États-Unis, près de 13 millions de tonnes de laitier d'aciérie ont été générées, dont seulement 1,7 millions ont été 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 autant de critères pertinents qu'il existe d'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. Différentes applications devrait 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'exploitabilité comme granulats dans le béton ou autres matrices rigides, [13]. Il n'existe aucun critère unique régissant 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 volumétrique 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 une expansion volumétrique générée par le laitier expansif ?

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

- (i) détermination du taux théorique d'expansion volumétrique du laitier, taux qui peut être obtenu à partir des réactions chimiques observées dans les échantillons réagissant à l'humidité ;
- (ii) essai d'expansion volumétrique 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'exploitabilité.

Les critères devraient être fondés sur la relation existant entre l'équation d'expansion volumétrique 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 grande porosité. La plupart des 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 donc, 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 sont très variables et changent d'un lot à l'autre, y compris au sein d'une même usine, en fonction des matières premières contenues, 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 grise [2, 14] et sont résumées dans le Tableau 1.

COMPOSITION CHIMIQUE (%)	FEO	MNO	P2O5	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 du laitier

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 séparation magnétique, concassage et criblage. Le laitier refroidi à l'air libre peut à la fois présenter de gros morceaux et des parties pulvérulentes.

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 composée de $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$, $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ et de cristaux mixtes de MgO, FeO et MnO (soit $\text{MgO}\cdot\text{MnO}\cdot\text{FeO}$) qui sont exprimées en RO. Le CaO peut aussi intégrer la phase RO. De plus, $2\text{CaO}\text{-Fe}_2\text{O}_3$, $\text{CaO}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$, $\text{CaO}\cdot\text{RO}\cdot\text{SiO}_2$, $3\text{CaO}\cdot\text{RO}\cdot 2\text{SiO}_2$, $7\text{CaO}\cdot\text{P}_2\text{O}_5\cdot 2\text{SiO}_2$ et d'autres oxydes sont contenus dans le laitier [2,15]. Il a été observé que les diagrammes de diffraction des rayons X sur le laitier sont proches de la cristallographie du clinker 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, du fer et des déchets métalliques sont chargés dans le four. Une certaine quantité de chaux libre F (F-CaO) est contenue dans le laitier. La chaux libre, présentant une densité spécifique de 3,34, peut réagir au contact de l'eau en produisant du Ca(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 volumétrique du laitier [16].

Le MgO contenu dans le laitier d'aciérie se remarque par la présence 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, c'est-à-dire en phase RO. La forme libre de l'espèce minérale MgO (périclase) est volumétriquement 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. Dans cette étude, la chaux libre est considérée comme étant le principal facteur contributif de l'expansion volumétrique du laitier d'aciérie.

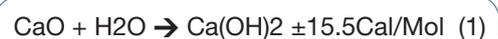
Expansion volumétrique théorique

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 déduction suivante, les variations de volume dues tant aux phénomènes chimiques que physiques seront 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 dans laquelle l'hydratation 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].

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

EQUATION DE LA RÉACTION	POIDS MOLÉCULAIRE	GRAVITÉ SPÉCIFIQUE	VOLUME ABSOLU DU SYSTÈME (CM3)		VOLUME ABSOLU DE LA PHASE SOLIDE (CM3)		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.

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 volumétrique 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.

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.

Expansion volumétrique 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 %.

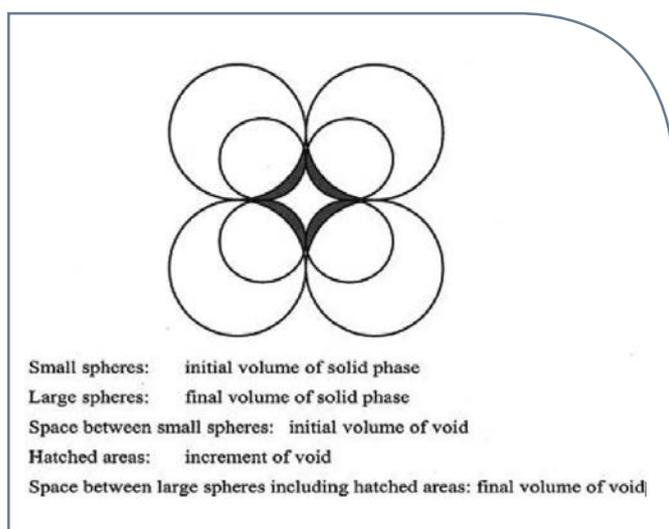


Figure 1

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

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 la déduction 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 la déduction formulée dans l'équation de l'expansion volumétrique.

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 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 volumétrique 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 volumétrique du laitier

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

Considérons un échantillon de granulats de laitier en vrac. Son volume total apparent est V_o , le volume réel de particules solides est V et le ratio V/V_o (ou γ_o/γ_s) est une mesure de la densité de masse du laitier (exprimée comme D). L'expansion volumétrique est définie comme étant le rapport entre l'augmentation du volume et le volume réel (solide) du laitier, à savoir :

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

Formule dans laquelle, ΔV est l'augmentation de volume du laitier. Comme indiqué, 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 $V\gamma_s$, la masse de chaux libre est $V\gamma_s F$ et le volume de chaux libre dans le laitier est $V\gamma_s F/\gamma_l$. L'expansion volumétrique, E_s , du laitier d'aciérie peut s'exprimer comme :

$$E_s = \frac{1}{V_o D} \times \frac{V_o D \gamma_s F}{\gamma_l} \times \frac{E_l}{100} \quad (3)$$

Dans cette formule, E_l représente l'expansion volumétrique de la chaux (%), totalisant 127,78 %, comme calculé ci-dessus ; E_s est l'expansion volumétrique du laitier (%); V_o est le volume total apparent du laitier (cm^3); D est la densité du laitier (γ_o/γ_s); F est la teneur en chaux libre du laitier (%); γ_o est la densité apparente des échantillons de laitier en vrac et comportant des vides (g/cm^3); γ_s est la gravité spécifique du laitier (g/cm^3); γ_l est la densité compactée de la chaux (g/cm^3).

Remplaçons $\gamma_l = 3,34$ et $E_l = 127,78\%$ dans l'équation (3),

$$E_s = 0.38 \times \gamma_s F \quad (4)$$

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

Essai en laboratoire de l'expansion volumétrique

Méthode d'essai et équipements employés

Dans la formulation de l'équation (4), le volume réel V, à savoir V_0D , 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. Intérieurement, le vide n'est pas normalement égal à zéro, c'est-à-dire que la densité D n'est jamais égale à 100 %. Pour vérifier si les vides d'un échantillon de laitier en vrac peuvent absorber l'expansion volumétrique du matériau sans gonflement apparent de la structure, et pour contrôler également l'équation de prédiction de l'expansion, des essais d'expansion volumétrique ont été effectués sur des échantillons de laitier soumis et non soumis à la contrainte d'une surcharge.

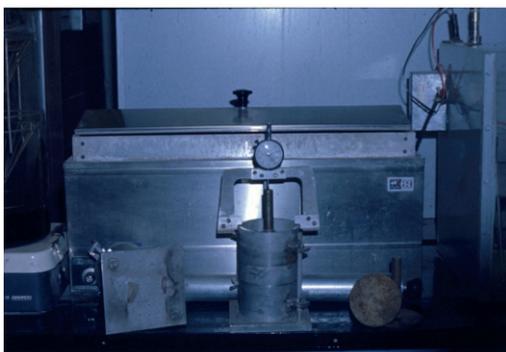


Figure 2

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

La méthode d'essai ASTM 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 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 volumétrique en parallèle

Les échantillons ont été initialement choisis pour le test d'expansion afin de vérifier qualitativement si des différences d'expansion volumétrique existent. Deux tests conduits en parallèle, avec et sans surcharge, ont été réalisés pour chaque échantillon avec une granulométrie nominale 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 de leur expansion volumétrique respective dérivée de l'équation 4 sont présentés dans le Tableau 3.

Les résultats du test d'expansion avec et sans surcharge sont montrés dans le Tableau 4.

Tableau 3

Caractéristiques des échantillons de laitiers d'aciérie choisis pour la comparaison d'expansion volumétrique

	LAC 1	LAC 2	LAC 3
Teneur en chaux libre (F – CaO %)	1.84	0.34	1.27
Gravité spécifique du laitier d'aciérie (Ys, g/cm³)	2.980	3.075	3.16
Expansion volumétrique estimée selon Eq. 4 (%)	2.08	0.39	1.52

JOURS D'ESSAI	LAITIER CBO 1			LAITIER CBO 2			LAITIER CBO 3		
	Expansion volumétrique (%)		Différentiel d'expansion (% _{K₂₅})	Expansion volumétrique (%)		Différentiel d'expansion (% _{K₂₅})	Expansion volumétrique (%)		Différentiel d'expansion (% _{K₂₅})
	Avec poids de charge	Sans poids de charge		Avec poids de charge	Sans poids de charge		Avec poids de charge	Sans poids de charge	
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 volumétrique.

A partir des résultats figurant dans les Tableaux 3 et 4, on peut voir que :

- (i) des différences d'expansion existent bien entre les échantillons chargés ou non,
- (ii) ces différences, ou différentiels K25 (= sous 25g/cm² de surcharge) varient de 7 % à 13 %,
- (iii) les limites les plus basses apparaissent lorsque la vitesse 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'exploitabilité. Il convient toutefois de retenir les seuils inférieurs de ces différences comme critères d'utilisation, ce qui permet de rester conservateur.

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

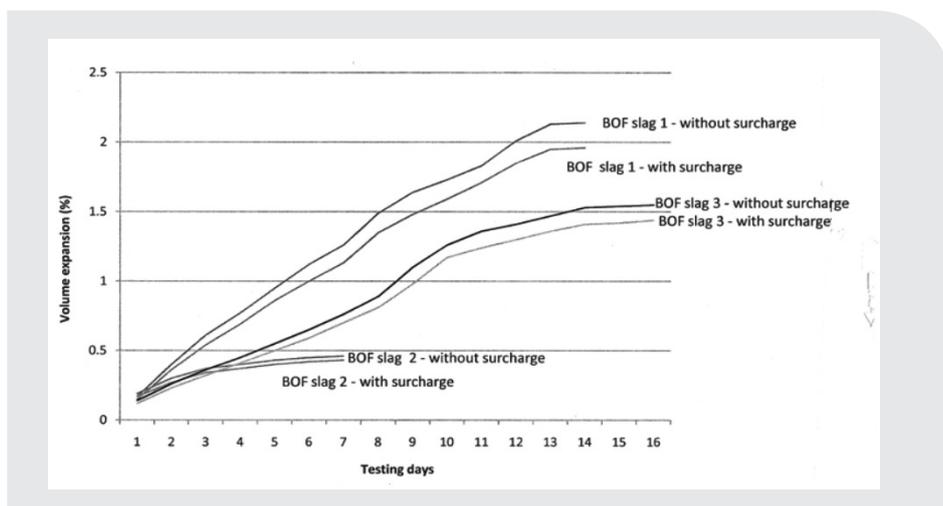


Figure 4

Résultats de l'expansion volumétrique pour les trois laitiers LAC avec et sans surcharge.

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

NUMÉRO D'ÉCHANTILLON	CBO 2-1	CBO 2-2	CBO 2-3	CBO 2-4	CBO 2-5	CBO 2-6
Y_o	2.346	2.278	2.149	2.307	2.189	2.243
Y_s	3.361	3.271	2.886	3.189	2.990	3.261
F (%)	2.7	3.5	3.3	3.1	2.4	3.4

Tableau 5

Densités et teneur en chaux libre des échantillons de laitiers

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

Tableau 6

Résultats de l'expansion volumétrique

Les résultats permettent de montrer que la valeur maximale d'expansion est comprise entre 0,56 % et 2,55 % (Tableau 5). La comparaison de deux essais parallèles pour chacun des échantillons permet de constater que les valeurs d'expansion des échantillons des laitiers placés sous charge sont en moyenne inférieures de 7,7 % à 10,9 % par rapport à celles des échantillons non chargés. Cette différence est appelée différentiel d'expansion et est exprimée sous la forme K25.

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

Les essais d'expansion volumétrique 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 volumétrique des laitiers ne se produira pas.

En d'autres termes, si

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

ou

$$0.38 \times \gamma_s F < 7.5\% (1 - \gamma_o / \gamma_s) \quad (6)$$

(avec une charge de 25g/cm²)

Il n'y aura pas d'expansion volumétrique apparente du matériau granulaire. Dans l'équation (5) le changement de volume figure à gauche 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 :

$$F < \frac{0.075(\gamma_s - \gamma_o)}{0.38\gamma_s^2} \times 100\% \quad (7)$$

Cela signifie que si la teneur en chaux libre des laitiers est inférieure à celle du terme figurant à droite de l'inéquation, les laitiers ne vont pas générer d'expansion macroscopique, ou que l'expansion résultant de la présence de chaux libre sera « absorbée » par les vides 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.

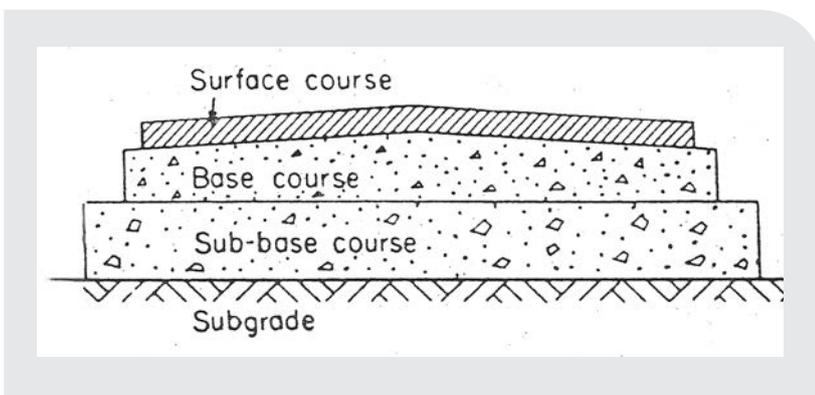
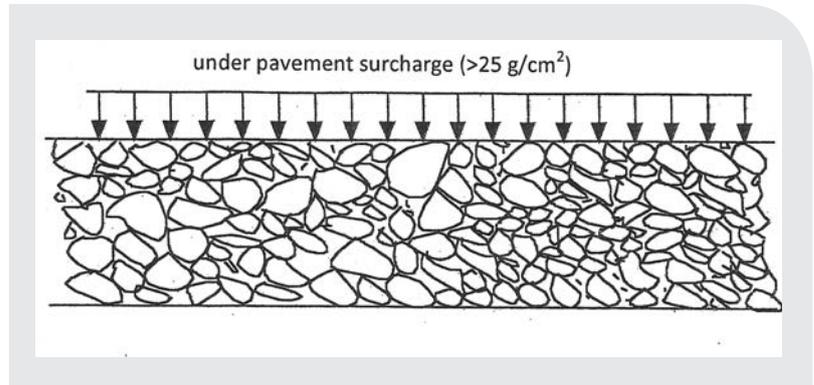


Figure 5
Vue de la structure de la chaussée

Figure 6

Couche de base ou de fondation de la chaussée en laitier d'aciérie, l'épaisseur de la couche superficielle 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 mélangé à chaud. Il est considéré que l'épaisseur de ces dernières est supérieure à 100 mm (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 :

$$F_{all} < 2.8\% + \frac{K_{25}(\gamma_s - \gamma_o)}{0.38\gamma_s^2} \times 100\% \quad (9)$$

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 volumétrique 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 de ≤ 4 %, la teneur en chaux libre tolérée est :

$$F_{all} < 2.0\% + \frac{K_{25}(\gamma_s - \gamma_o)}{0.38\gamma_s^2} \times 100\% \quad (8)$$

Où F_{all} est la teneur maximum en chaux libre admissible pour un laitier donné dont l'emploi est envisagé comme matériau granulaire sous réserve qu'il soit mis en œuvre sous des couches de chaussée ayant une épaisseur supérieure à 100 mm 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 de ciment ou d'asphalte mise en œuvre par dessus la couche de base ou la couche de fondation en agrégats de laitier d'aciérie. Il ressort des résultats de ces essais sur six échantillons, que les teneurs en chaux libre pouvant être tolérées pour une utilisation sécuritaire de matériau en tant que couche de base ou couche de fondation granulaires varient entre 3,7 % entre 3,9 %, à condition que ces matériaux soient mis



Figure 7

Agrégats 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 du laitier en tant que matériau granulaire, 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 d'asphalte, de bétons de ciment et aux matériaux granulaires. Les critères élaborés peuvent être repris pour des laitiers sidérurgiques ou non ferreux, producteurs et utilisateurs, afin d'évaluer l'exploitabilité potentielle de leurs produits pour la construction de routes et d'autoroutes.



Figure 8

Les agrégats 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 volumétrique maximale du laitier d'aciérie peut être évaluée à partir de l'équation d'expansion théorique. Le calcul de l'expansion volumétrique, fondé sur la teneur en chaux libre, s'avère pratique et fiable dans le cadre d'une évaluation de l'exploitabilité d'un laitier particulier. Les expansions volumétriques 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 volumétrique 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 volumétrique 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 le moins prononcé et le plus pertinent pour l'élaboration des critères d'exploitabilité, tel qu'il aura été observé au cours des derniers jours d'hydratation lors du test d'expansion, est d'environ 7 %, ; il n'est pas lié à la teneur en chaux libre. Pour les laitiers sidérurgiques et d'autres scories non ferreuses susceptibles de subir une expansion volumétrique lors d'une utilisation en tant que matériaux granulaires non compactés, l'expansion volumétrique apparente doit être prise en compte. Pour l'utilisation du laitier en tant que granulats liés dans une matrice rigide, un béton de ciment Portland par exemple, la force d'expansion, plutôt que le coefficient d'expansion volumétrique, devrait être utilisée pour pouvoir élaborer le critère d'exploitabilité.

Les critères ainsi élaborés peuvent servir d'indicateurs pour l'utilisation des laitiers en tant que matériaux granulaires. Ils peuvent également être utilisés pour l'emploi des scories non ferreuses. Concernant ces dernières ou des scories présentant d'autres propriétés physiques, il est important d'effectuer des essais en laboratoire afin de déterminer les différentiels d'expansion volumétrique respectifs, représentés par K_{25} , sachant que ceux-ci peuvent venir remplacer le facteur ad hoc dans les équations (8) et (9), avant d'utiliser les critères.

Dans la plupart des cas, le coefficient d'expansion volumétrique 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 trouver les relations existant entre les diverses caractéristiques physiques des agrégats 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. Tsivilis, 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).

LAITIERS
sidérurgiques

www.ctpl.info