

Erwann RAYSSAC*
Jean-Claude AURIOL
Dimitri DENELE
Francois de LARRARD
Vincent LEDEE
Gérard PLATRET

Laboratoire central des Ponts et Chaussées,
Paris, France

Valorisation de laitiers d'aciérie LD pour les infrastructures routières

■ RÉSUMÉ

Les laitiers « LD » (laitier de convertisseur à oxygène suivant la méthode « Linz-Donavitz ») présentent d'excellentes propriétés mécaniques ainsi qu'un bon coefficient de polissage. Cependant, ces matériaux sont sujets à des gonflements résultant de l'hydratation de la chaux et de la magnésie libres présentes en forte quantité dans la matrice du laitier. Ces risques de gonflements limitent en conséquence l'usage de ces matériaux dans les structures routières. Pour minimiser les effets expansifs, il est possible de vieillir artificiellement le laitier LD par hydratation accélérée (arrosage ou traitement à la vapeur d'eau par exemple), ou de neutraliser une partie de la chaux et de la magnésie à la source. Une troisième voie est ici proposée consistant à mélanger du laitier LD frais avec des granulats inertes en optimisant la répartition granulométrique de façon à absorber l'expansion des grains de laitier dans les vides. La simulation de plusieurs mélanges à l'aide du logiciel d'empilement de grains René-LCPC, a permis de tester différentes proportions de laitiers par rapport aux granulats inertes. Les résultats expérimentaux ont montré que jusqu'à 50 % de laitier, il y a une très bonne concordance entre le mélange réel expérimenté et le mélange simulé. Ces premiers travaux montrent qu'il est possible de modéliser les gonflements d'un mélange comportant du laitier LD, mais également de valider l'hypothèse que les gonflements peuvent être absorbés dans les vides. Cette étude ouvre donc des perspectives intéressantes dans le cadre de la valorisation immédiate de laitier LD de fraîche production pour une utilisation dans des structures routières qui ne tolèrent aucune expansion volumique.

Reuse of "LD" steel slag in road infrastructure applications

■ ABSTRACT

So-called "LD" slag (produced in an oxygen converter at a steelmaking plant, in accordance with the "Linz-Donavitz" method) displays outstanding mechanical properties along with a good polishing coefficient (PSV) value. These materials however are prone to swelling as a result of the hydration of free lime and magnesia, which are present in large quantities within the slag matrix. These swelling risks consequently limit use of such materials in road structures. In order to minimize the expansive effects, it is possible to artificially age "LD" slag by means of either accelerated hydration (e.g. sprinkling or water vapor treatment) or neutralization of a portion of lime and magnesia at the source. This article will propose a third avenue, which calls for mixing fresh "LD" slag materials with inert aggregates while optimizing the particle size distribution so as to absorb slag grain expansion within the voids. A simulation of several mixes using the "René-LCPC" grain packing software makes it possible to test various slag proportions with respect to the inert aggregates. Experimental results show that up to a 50% slag composition, a very high level of agreement exists between the actual mix undergoing experimentation and the simulated mix. This initial research effort underscores the potential to model the swelling of a mix containing "LD" slag, as well as to validate the hypothesis that swelling may be absorbed in the mix voids. This study thus opens new and worthwhile perspectives within the scope of an immediate reuse application for freshly-produced "LD" slag in road structures unable to accommodate any volumetric expansion.

* AUTEUR À CONTACTER :
Erwann RAYSSAC
erwann.rayssac@lcpc.fr

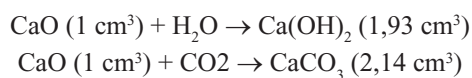
INTRODUCTION

Les trois principaux centres producteurs d'acier français (Dunkerque, Fos-sur-mer, Région Lorraine) génèrent annuellement environ 1,2 million de tonnes de laitiers LD, soit 54 % de la production de laitiers d'aciérie française. De ces productions, 310 000 tonnes sont mis en stock et 403 000 tonnes sont valorisés en travaux publics (remblais et couches de chaussée...)[1].

Si les laitiers LD s'avèrent être d'excellents matériaux du point de vue mécanique (Los Angeles de 10 et Micro-Deval de 7) et présentent un bon coefficient de polissage (PSV de 0,55), leur emploi en techniques routières comme matériaux de remblai, de couche de forme ou de chaussée reste conditionné par une stabilité volumique qui garantirait tout risque de désordre et de dégradations des chaussées. En effet, ces matériaux sont sujets à des gonflements, pouvant apparaître plusieurs mois, voire plusieurs années après leur mise en place. Ceux-ci résultent en grande partie de l'hydratation expansive de la chaux (CaO) et de la magnésie libre (MgO) contenus dans ces laitiers.

Ces phases, résultant de l'utilisation de chaux et de magnésie lors du procédé d'affinage de la fonte, peuvent se retrouver sous forme d'inclusions libres dans ces laitiers, inclusions dont la taille peut varier de quelques microns à quelques millimètres. [2]

La chaux et la magnésie sont plus ou moins bien encapsulés dans le laitier, ce qui n'empêche pas leur susceptibilité à l'eau ou au gaz carbonique de l'air, entraînant leur lente hydratation et leur carbonatation, et se traduisant par une expansion volumique du minéral et un délitement du granulat de laitier. On estime que l'hydratation de la chaux vive s'accompagne d'un doublement de volume :



A un degré moindre, d'autres espèces minérales, présentes dans les laitiers LD, peuvent s'hydrater (comme certains silicates calciques par exemple) pour donner naissance à des produits secondaires à l'origine de gonflements, certes minoritaires mais participant à l'expansion globale du matériau [3].

L'emploi des laitiers LD est actuellement réglementé dans la construction routière par des valeurs seuils de gonflement (normes produits européennes [4, 5] et XP P 18-545 [6]). Le contrôle du gonflement des laitiers LD est réalisé suivant le test décrit dans la norme essai NF EN 1744-1 [7], conduit sur 24 h ou 168 h suivant que la teneur en MgO est inférieure ou supérieure à 5 %.

Les valeurs limites de gonflement s'appuient principalement sur des observations issues de la mise en œuvre industrielle du laitier LD et de retours d'expériences [8], avec les règles suivantes recommandées :

- un taux de gonflement maximal pour les couches d'assise et de forme de 5 % ;
- un taux de gonflement maximal pour la couche de roulement de 3,5 %.

C'est ainsi que les voies principales en cours d'exploration dans le cadre d'activités de recherche en France visent à minimiser ces effets expansifs, par une approche portant sur l'optimisation du vieillissement ou sur la mise au point des formulations prenant en compte le potentiel de gonflement de ces laitiers.

Déjà, concernant les techniques de vieillissement, l'usage veut que le laitier LD produit soit laissé à l'air libre pendant plusieurs mois, soumis aux intempéries (figure 1) ; cette approche permet de le faire évoluer mais cette évolution est trop limitée. D'où le développement d'autres techniques :

- au Brésil, les industriels ont amélioré la technique en stockant le laitier en tas minces, arrosés et brassés pendant au maximum 2 mois (procédé CST) ;
- des méthodes de vieillissement à la vapeur ont été également développées et sont exploitées au Japon avec des résultats satisfaisants (même principe que le test européen à la vapeur) ;
- le laitier peut également être traité à la source avec le procédé Thyssen, développé en Allemagne, permettant sa valorisation immédiate. Il s'agit ici d'ajouter du sable siliceux dans le laitier liquide,

figure 1
Stock de laitier LD
de l'usine Arcelor de
Dunkerque.



en combinaison avec un soufflage d'oxygène. Ce procédé très efficace, permet de réduire le gonflement à 0,5 % (test européen).

L'autre voie envisagée est de constituer des mélanges avec du laitier LD non mûré, mais optimisés pour absorber les gonflements. Cette technique permettrait de valoriser le laitier LD sans avoir recourt à une période de maturation.

Dans le cadre d'une convention CTPL (Centre technique de promotion des laitiers) / LCPC, suivie dans le cadre de la CNL (Commission nationale des laitiers), il a donc été entrepris une étude visant à utiliser la fraction 0/10 mm du laitier LD en mélange, et ce pour une valorisation dans des techniques routières.

Il s'agissait de mettre au point une méthode de formulation de mélanges constitués de fractions de laitier LD de fraîche production 0/10 mm associée à des granulats inertes, tels que le gonflement du laitier LD comble la porosité du mélange, sans engendrer de gonflement macroscopique excessif [10, 11].

Dans le cadre de ce programme, le choix s'est porté sur la constitution de graves non traités (GNT) [18] en associant au laitier des matériaux granulaires inertes de fraction 10/20 mm.

Cette méthode de formulation s'appuie sur l'utilisation du logiciel *René-LCPC*, développé en 1994 par le LCPC [17] ; la stabilité volumique des mélanges constitués a été contrôlée par le test d'expansion à la vapeur [7].

Au cours de ce travail, on s'est intéressé uniquement à la stabilité volumique des mélanges, sans aborder leurs propriétés géotechniques. Cette stabilité volumique (gonflement) est calculée par « différence » entre les compacités et masses volumiques d'un mélange incluant du laitier LD brut et les compacités et masses volumiques d'un mélange incluant du laitier LD mûré (pour une même répartition granulométrique). Cela permet de proposer un gonflement théorique des mélanges constitués qui est ensuite comparé au gonflement des mélanges soumis à l'essai vapeur.

LE LAITIER DE CONVERTISSEUR À OXYGÈNE OU LAITIER « LD » DE DUNKERQUE

Dans le cadre de cette étude, le Centre technique de promotion des laitiers a fourni un laitier « LD » provenant de l'usine Arcelor de Dunkerque. Il s'agissait d'étudier un matériau représentant une production standard, notamment avec des teneurs en chaux « libre » et des taux de gonflement représentatifs.

Ce laitier LD a été caractérisé afin de connaître son comportement mécanique (comportement à la fragmentation et à l'usure, masse volumique), ses constituants (caractérisation physico-chimique),

figure 2
Appareillage du test
d'expansion à la vapeur.



avec notamment sa teneur en chaux « libre », et son comportement vis-à-vis du test de gonflement à la vapeur (réalisés suivant le test européen d'expansion à la vapeur [7]).

Les essais de masse volumique et de résistance mécanique (**tableau 1**) montrent que le laitier LD est un matériau aux caractéristiques mécaniques de tout premier ordre, mais dont la densité élevée peut être pénalisante en cas de transport sur de longues distances.

tableau 1
Récapitulatif des essais
sur le laitier initial.

	Fraction (mm)		
	0,5/4	4/31,5	6/10
Masse volumique absolue (t/m³)	3,1	3,4	
Masse volumique réelle (t/m³)	3,1	3,2	
MDE			7,4
Los Angeles			10,0

Les analyses physico-chimiques ont été mené sur une grave 0/80 mm et complétés par d'autres analyses identiques sur des fractions plus serrées 0/8, 8/20, 20/40 et 40/70 mm ; ceci pour évaluer l'influence de la taille des grains sur le comportement du laitier (**tableau 2**).

Les principales phases minérales du laitier de Dunkerque, identifiées par diffraction des rayons X et analyses thermiques sont les suivantes : alite (Ca_3SiO_5), larnite (Ca_2SiO_4), browmillerite ($\text{Ca}_2(\text{Al}, \text{Fe})_2\text{O}_5$), wustite (FeO) et chaux libre (CaO) (**tableau 2**). Seules des traces de magnésie (MgO) ont été détectées dans nos échantillons, alors que la brucite ($\text{Mg}(\text{OH})_2$) est absente.

Il en ressort également que la fraction fine 0/8 mm présente une perte au feu globale plus élevée (4,86 %), et des teneurs en chaux hydratée (portlandite $\text{Ca}(\text{OH})_2$) et carbonatée (calcite CaCO_3) beaucoup plus élevées. C'est également une fraction présentant de plus faibles quantités des phases larnite (Ca_2SiO_4), wustite (FeO) et chaux (CaO).

D'après l'ensemble des analyses et observations, il n'apparaît pas d'autres phases hydratées telles que la brucite ($\text{Mg}(\text{OH})_2$), alors que des traces de magnésie ont été détectées dans le laitier brut.

Le laitier LD de Dunkerque testé dans le cadre de cette expérimentation peut être considéré comme un matériau représentatif des laitiers LD fabriqués en France de part sa composition minéralogique classique. Son taux en chaux libre non hydratée, est d'environ 10 %.

Vis-à-vis du comportement au test de gonflement à la vapeur, les résultats sont moyens avec un taux de gonflement maximum à 24 h de 6,9 % et à 168 h de 10 % (**tableau 3**). Ce qui en fait un matériau impropre à une utilisation en structure routière en l'état.

tableau 2
*Analyses chimiques,
 analyse RX et analyses
 thermiques du laitier LD
 « frais ».*

	Formule chimique	Fractions (mm)				
		0/70	0/8	8/20	20/40	40/70
Silice soluble	SiO ₂	12,09	10,86	12,08	12,50	11,34
Oxyde d'aluminium	Al ₂ O ₃	1,11	1,18	1,09	1,03	0,69
Oxyde de titane	TiO ₂	0,24	0,23	0,24	0,24	0,16
Oxyde ferrique	Fe ₂ O ₃	12,00	10,56	12,49	13,01	10,65
Oxyde de calcium	CaO	45,68	44,46	46,63	46,87	45,86
Oxyde de magnésium	MgO	5,44	5,23	5,77	5,57	4,59
Oxyde de sodium	Na ₂ O	0,05	0,05	0,05	0,05	0,06
Oxyde de potassium	K ₂ O	0,03	0,03	0,03	0,04	0,03
Oxyde de manganèse	MnO	2,04	1,81	2,44	2,08	1,98
Soufre des sulfures	S ⁻	0,86	nd	nd	nd	nd
Fluorures	F ⁻	0,10	0,09	0,07	0,08	0,10
Chlorures	Cl ⁻	tr	tr	tr	tr	tr
Sulfates	SO ₄ ⁻	0,12	0,16	0,11	0,11	0,41
Phosphates	HPO ₄ ⁻	1,29	1,32	1,40	1,39	1,44
Total des éléments dosés		81,05	75,98	82,40	82,97	77,31
Résidus insolubles (RI)		20,81	20,67	20,06	20,05	25,74
Perte au feu à 550 °C (PAF)		0,00	2,38	0,15	-0,13	-0,14
Chaux libre	CaO	10,1 ± 0,5	10,2 ± 0,5	9,8 ± 0,5	9,6 ± 0,5	11,4 ± 0,1
Dioxyde de carbone	CO ₂	0,18	1,33	0,19	0,16	0,24
Perte au feu totale		1,10	4,86	1,18	1,08	1,29
à		720 °C	1150 °C	760 °C	750 °C	770 °C
Teneur en portlandite	Ca(OH) ₂	2,02	6,70	2,14	2,06	2,22
Teneur en calcite	CaCO ₃	0,41	3,02	0,43	0,36	0,55
Teneur en brucite	Mg(OH) ₂	0,00	??	0,00	0,00	0,00
Alite	Ca ₃ SiO ₅	+	+	+	+	+
Larnite C ₂ S	Ca ₂ SiO ₄	++++	++	++++	++++	++++
Akermanite	Ca ₂ MgSi ₂ O ₇	Tr ?	Tr ?	Tr ?	Tr ?	Tr ?
Merwinite	Ca ₃ Mg(SiO ₄) ₂	+	+	+	+	+
Géhlénite	Ca ₂ Al ₂ SiO ₇	-	-	-	-	-
Enstatite	MgSiO ₃	Tr	Tr	Tr	Tr	tr
Brownmillerite	Ca ₂ (AlFe) ₂ O ₅	++	Tr	+	+	+
Hématite	Fe ₂ O ₃	-	-	-	-	-
Magnétite	Fe ₃ O ₄	-	-	-	-	-
Wustite	FeO	+++	+	+++	+++	++++
C ₃ A	Ca ₃ Al ₂ O ₆	-	-	-	-	-
Portlandite	Ca(OH) ₂	++	++	++	++	+
Brucite	Mg(OH) ₂	NON	NON	NON	NON	NON
Chaux	CaO	+++	+	+++	+++	+++
Périclase	MgO	+	Tr	NON	NON	Tr
Calcite	CaCO ₃	+	+	+	+	+
Quartz	SiO ₂	-	++++	-	-	-
Anhydrite	CaSO ₄	-	-	-	-	-
Géhlénite hydratée	Ca ₂ Al ₂ SiO ₇ .2H ₂ O	-	-	-	-	-
Fer métal	Fe	-	-	-	-	-

Tr : trace

Tr ? : trace incertaine

Tr+ : trace en augmentation

Tr- : trace en diminution

+: quantité faible

++ : quantité moyenne

+++ : quantité forte

++++ : quantité très forte

- : non identifiée

Case vide : non recherché

tableau 3
Taux de gonflement au test
d'expansion à la vapeur.

Laitier LD Dunkerque Fraction 0/70 mm	Taux de gonflement (%) (Suivant la norme EN1744-1 & 19.3)	
	à 24 heures	à 168 heures
	6,9	10,0

LES MATÉRIAUX SÉLECTIONNÉS POUR LA CONSTITUTION DE LA GNT

Dans le cadre de cette étude, c'est une fraction 0/10 mm provenant de l'usine Arcelor de Dunkerque qui a été choisie et livrée en 2003. Enfin, pour obtenir la grave 0/20 mm, les matériaux sélectionnés comme matériaux dits « inertes » sont les suivants :

- une fraction 10/20 mm de laitier cristallisé de haut fourneau (HF) de la même usine ;
- une fraction 10/20 mm de calcaire des carrières du Boulonnais.

Ces trois matériaux ont fait l'objet d'un criblage afin d'extraire les fractions élémentaires suivantes : 0/0,08 mm, 2/6,3 mm, 0,08/0,315 mm, 0,315/2 mm, 6,3/10 mm et 10/20 mm (uniquement pour le calcaire et le laitier HF). Un quatrième composant a été préparé en maturant les différentes fractions de laitier LD avec un courant de vapeur à 100 °C (cf. [figure 2](#)).

Pour chacun des quatre matériaux, les différentes caractéristiques constituant les données d'entrée du logiciel ont été mesurées au LCPC pour chaque fraction élémentaire, avec le plus de précaution possible, notamment pour le laitier LD (cf. [figure 3](#), [tableaux 4 et 5](#)). A ce titre, les mesures des masses volumiques ont été réalisées avec de l'éthanol de manière à limiter l'hydratation de la chaux contenue dans les laitiers LD.

figure 3
Courbes granulométriques
par tamisage du laitier
0/10 mm de fraîche
production et du laitier
maturé.

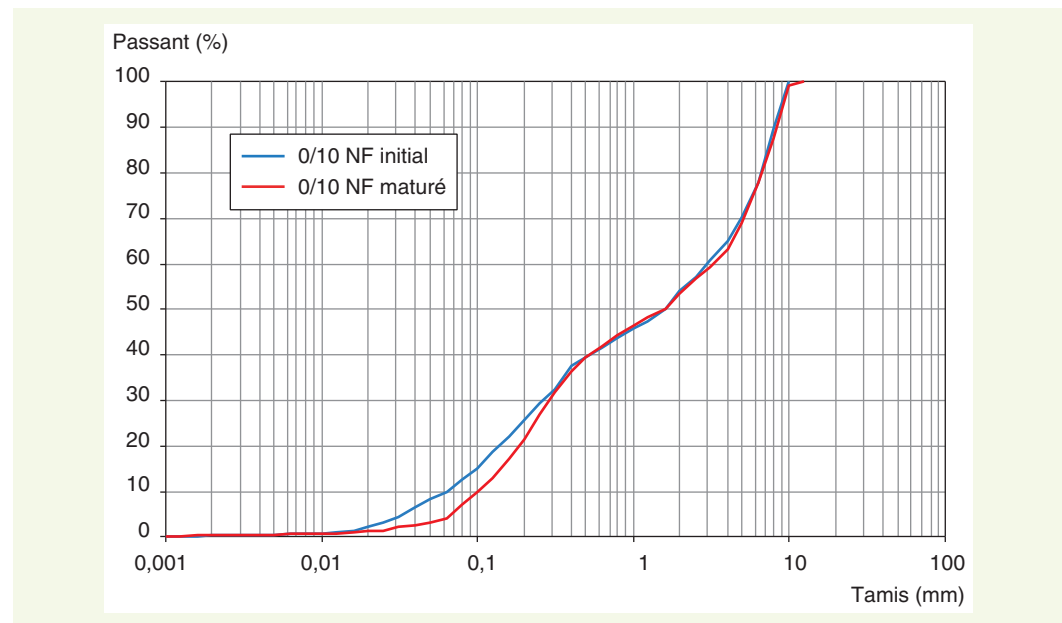


tableau 4
Masses volumiques réelles
des fractions élémentaires.

Fraction (mm)	Masse volumique ρ_{rd} (g/cm ³)					
	< 0,08*	0,08/0,315*	0,315/2	2/6,3	6,3/10	10/20
Laitier LD	2,76	2,76	2,96	3,06	3,09	
Laitier LD maturé	2,88	2,88	2,99	3,11	3,14	
Matériaux inertes						
Calcaire	2,74	2,73	2,70	2,64	2,64	2,67
Laitier HF	2,90	2,73	2,65	2,48	2,40	2,36

* Analyse granulométrique avec granulomètre laser Malvern

tableau 5
Compacités des fractions
élémentaires, mesurées
selon le mode opératoire
LCPC [18].

Fraction (mm)	Compacité					
	< 0,08 *	0,08/0,315	0,315/2	2/6,3	6,3/10	10/20
Laitier LD	0,461	0,444	0,482	0,551	0,568	
Laitier LD Maturé	0,432	0,392	0,446	0,533	0,548	
Matériaux inertes						
Calcaire	0,678	0,548	0,624	0,618	0,596	0,575
Laitier HF	0,501	0,573	0,633	0,601	0,594	0,568

* Essai Rigden

PRÉSENTATION DE LA MÉTHODE

La méthode utilise le modèle d'empilement compressible (MEC) implémenté dans le logiciel René-LCPC et permet « à partir d'un jeu de constituants caractérisés par leur distribution granulaire (courbe granulométrique) et par les compacités des tranches monodimensionnelles... », de prédire les paramètres d'un mélange donné, soit :

- la **compacité** d'un mélange quelconque de constituants granulaires ;
- l'**indice de serrage** de toute suspension à porosité donnée ;
- la **porosité** de toute suspension à indice de serrage donné.

La première étape consiste à déterminer l'**indice de serrage** qui caractérise l'efficacité du dispositif utilisé pour compacter les mélanges dans les cylindres du test d'expansion à la vapeur (table vibrante). Cette procédure est décrite dans la norme d'essai NF EN 1744-1 [7] avec les caractéristiques suivantes : 4 500 g de matériau, recomposé suivant la courbe de Fuller, compacté dans un cylindre de 210 mm de diamètre. La table vibrante compacte dynamiquement l'échantillon sec pendant 6 min à une fréquence de (48 ± 3) Hz (amplitude $\pm 1,5$ mm) et sous une pression de $0,035$ N/mm².

En effet, cette méthode n'a aucune raison, a priori, de compacter de la même façon que dans le procédé utilisé dans la méthode LPC [19]. Cet indice de serrage est ensuite appliqué pour les simulations des mélanges.

Le calcul de l'indice de serrage est obtenu en mesurant la porosité d'un mélange de type Fuller après compactage. La hauteur moyenne (quatre points) du matériau compacté dans le cylindre est mesurée puis par application de la formule :

$$Porosité = 1 - \frac{Masse\ volumique\ apparente}{Masse\ volumique\ réelle}$$

on déduit la porosité initiale (état non maturé). Le logiciel René-LCPC calcule, à partir de cette porosité, un indice de serrage de $K = 13,37$.

L'indice de serrage connu, la formulation des mélanges associant un 0/10 mm de laitier LD et un 10/20 mm inerte peut être réalisée. Elle consiste à calculer la différence entre porosité (ou compacité) initiale (laitier « frais ») et porosité finale (après maturation), pour en déduire l'expansion volumique théorique du mélange 0/20 mm, en fonction de la proportion de laitier LD.

FORMULATION DES MÉLANGES

La procédure de simulation se décompose de la manière suivante :

- Saisie des constituants (figure 4)

Dans le logiciel René-LCPC, quatre constituants sont créés par reconstitution à partir des fractions serrées : le 0/10 mm LD frais, le 0/10 mm LD maturé, le 10/20 mm calcaire et le 10/20 mm laitier HF, et leurs trois caractéristiques sont entrées (masse volumique, granulométrie, compacité).

– Choix des constituants (figure 5)

Dans un premier temps, il s'agit de sélectionner dans la liste des constituants, un mélange 0/10 mm laitier LD frais puis un 10/20 mm de laitier HF, par exemple.

– Lancement du calcul (figures 5 et 6)

La simulation est réalisée en fixant l'indice de serrage à $K = 13,37$, en milieu non confiné.

Ce calcul est répété avec le laitier LD 0/10 mm mûr pour obtenir un tableau comportant la porosité des mélanges avant et après maturation du laitier LD (tableau 6).

Pour chaque mélange, le calcul de l'expansion volumique théorique est obtenu avec la formule suivante :

$$G_{\%} = \left(\frac{C_i \times \rho_i}{C_M \times \rho_M} - 1 \right) \times 100$$

figure 4

Création d'un mélange 0/10 mm frais dans René-LCPC.

figure 5

Simulation d'un mélange 0/10LD 10/20HF.

figure 6

Résultat du calcul de la porosité d'un mélange LD/HF dans René-LCPC.

4

Propriétés du constituant

Granulometrie en passant	d (µ)	z	d (µ)	z
10	0	400	38	
12.5	1.6	500	40	
16	1.7	630	42	
20	2.4	800	44	
25	3.5	1 000	46	
31.5	4.9	1 250	47	
40	7.1	1 600	50	
50	9.1	2 000	52	
63	11.2	2 500	55	
80	14	3 150	58	
100	17	4 000	62	
125	20	5 000	67	
160	25	6 300	74	
200	28	8 000	83	
250	31	10 000	93	
315	35	12 500	100	

Compacités propres des classes granulaires

d en µ	Compacité
10	0.3814
12.5	0.3814
16	0.3814
20	0.3814
25	0.3814
31.5	0.3814
40	0.3814
50	0.3814
63	0.3814
80	0.3814
100	0.3814
125	0.3808
160	0.3808
200	0.3808
250	0.3808
315	0.3808

5

Choix des matériaux pour le mélange

Dossiers disponibles: calcaire.mat, exemple.mat, laitlf.mat, laitld.mat, laitmat.mat

Constituants disponibles: 0.080/0.315, 0.315/2, 10/20, 2/6.3, 6.3/10

Constituants sélectionnés pour le mélange: laitld.mat:\M_0/10NF, laitlf.mat:\10/20

Données des calculs

% en masse: 0 laitld:\M_0/10NF, 100 laitlf:\10/20

Milieu infini (sélectionné)

Entrer la valeur de un indice de compaction visé: 13.37

6

Résultats:

Constituant n°0	Constituant n°1	Porosité	Indice de compaction	Masse vol. à sec	Masse vol. saturé
100	0	0.2867	13.37	2097.1	2383.8
90	10	0.264	13.37	2112.1	2376.0
80	20	0.2421	13.37	2123.9	2365.9
70	30	0.2235	13.37	2126.2	2349.7
60	40	0.2168	13.37	2096.5	2313.3
50	50	0.2352	13.37	2002.4	2237.6
40	60	0.2679	13.37	1875.8	2143.7
30	70	0.302	13.37	1750.9	2052.9
20	80	0.3339	13.37	1636.5	1970.4
10	90	0.363	13.37	1533.7	1896.6
0	100	0.3891	13.37	1441.7	1830.8

Résultats:

Constituant n°0	Constituant n°1	Porosité	Indice de compaction	Masse vol. à sec	Masse vol. saturé
100	0	0.3731	13.37	1887.1	2260.1
90	10	0.345	13.37	1918.6	2263.7
80	20	0.3167	13.37	1949.4	2266.1
70	30	0.289	13.37	1976.7	2265.7
60	40	0.2661	13.37	1989.9	2255.9
50	50	0.2616	13.37	1953.6	2215.2
40	60	0.2817	13.37	1855.4	2137.1
30	70	0.31	13.37	1741.2	2051.2
20	80	0.3384	13.37	1631.8	1970.2
10	90	0.3649	13.37	1531.8	1896.8
0	100	0.3891	13.37	1441.7	1830.8

avec C_i la compacité du mélange initial, ρ_i la masse volumique réelle du mélange initial, C_M la compacité du mélange final et ρ_M la masse volumique réelle du mélange final.

Cette procédure est reconduite pour la simulation des mélanges avec le 10/20 mm calcaire.

RÉSULTATS ET VALIDATION EXPÉRIMENTALE DES MÉLANGES PROPOSÉS

Les mélanges sont réalisés à partir du laitier LD 0/10 mm auquel on associe une fraction 10/20 mm de laitier HF ou de calcaire. Les proportions de matériaux dans les mélanges sont des proportions massiques, composant ainsi des mélanges de 0 à 100 % de laitiers LD.

Le **tableau 6** présente l'exemple de la simulation avec un 10/20 mm calcaire : en bleu foncé les porosités calculées par René-LCPC, en bleu clair, les masses volumiques mesurées ; la dernière colonne présente le taux de gonflement théorique (calculé).

Sur la **figure 7**, les deux courbes représentent les taux de gonflement calculés avec le calcaire et avec le laitier HF, en fonction du pourcentage de laitier LD 0/10 mm.

tableau 6
Calcul des expansions volumiques d'un mélange laitier LD/calcaire.

Laitier LD (%)	Calcaire (%)	Porosité initiale	Porosité finale	Mv réelle initiale (g·cm ⁻³)	Mv réelle finale (g·cm ⁻³)	Gonflement théorique (%)
100	0	0,287	0,373	2,94	3,04	10,04
90	10	0,266	0,348	2,91	3,00	9,23
80	20	0,246	0,322	2,88	2,96	8,34
70	30	0,227	0,295	2,85	2,92	7,27
60	40	0,214	0,270	2,83	2,88	5,69
50	50	0,221	0,256	2,80	2,84	3,02
40	60	0,250	0,267	2,77	2,81	1,04
30	70	0,285	0,294	2,75	2,77	0,37
20	80	0,320	0,325	2,72	2,74	0,13
10	90	0,352	0,350	2,69	2,70	0,05
0	100	0,381	0,381	2,67	2,67	0,00

Pour vérifier expérimentalement les taux de gonflement, cinq mélanges, pour chacun des matériaux inertes, sont testés selon la procédure d'essai EN 1744-1 (**tableau 7** et **figure 7**).

Les mélanges sont réalisés directement dans les cylindres par empilement de couches successives d'éléments gros et d'éléments fins afin d'obtenir la meilleure homogénéité possible. Le test à la vapeur est réalisé pendant 168 heures pour atteindre le maximum d'évolution.

L'analyse des différents tests réalisés (**figures 7 à 9**) montre que :

– pour les faibles teneurs en éléments fins (mélanges dits à « gros dominants »), les mélanges sont suffisamment poreux et perméables pour laisser passer la vapeur. Les fines de laitier LD s'hydratent et se réarrangent localement, minimisant l'impact sur le squelette des gros grains. Le modèle René-LCPC s'applique bien ;

tableau 7
Programme des vérifications expérimentales sur la machine d'expansion à la vapeur.

Mélange 100 % LD-0 % HF Mélange 70 % LD-30 % HF Mélange 50 % LD-50 % HF Mélange 40 % LD-60 % HF Mélange 25 % LD-75 % HF	Mélange 80 % LD-20 % calcaire Mélange 60 % LD-40 % calcaire Mélange 50 % LD-50 % calcaire Mélange 30 % LD-70 % calcaire Mélange 20 % LD-80 % calcaire
---	---

figure 7
 Courbes de gonflement théorique et mesuré du laitier de haut fourneau, en fonction du pourcentage de laitier LD.

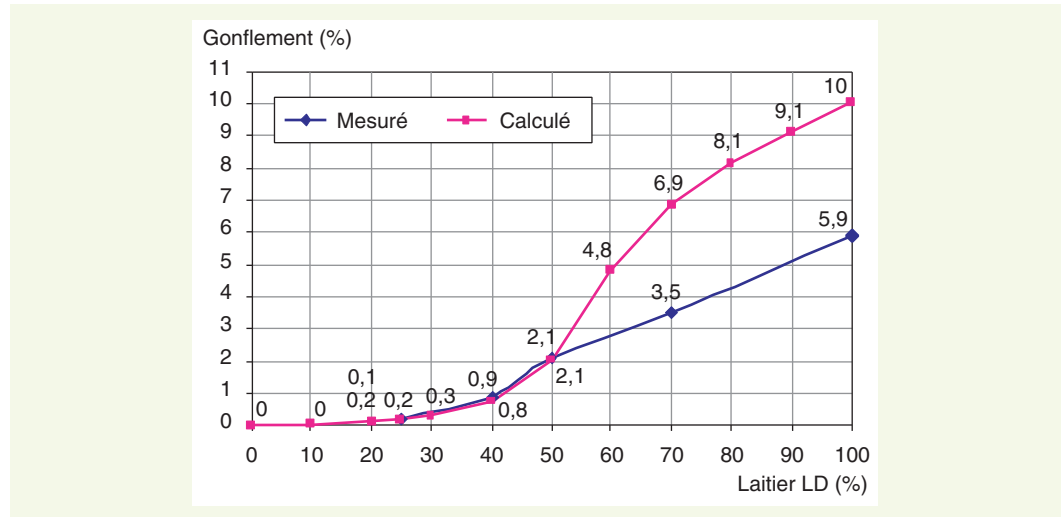


figure 8
 Gonflements théoriques en fonction du pourcentage de laitier LD (en points rouges figurent les mélanges testés expérimentalement).

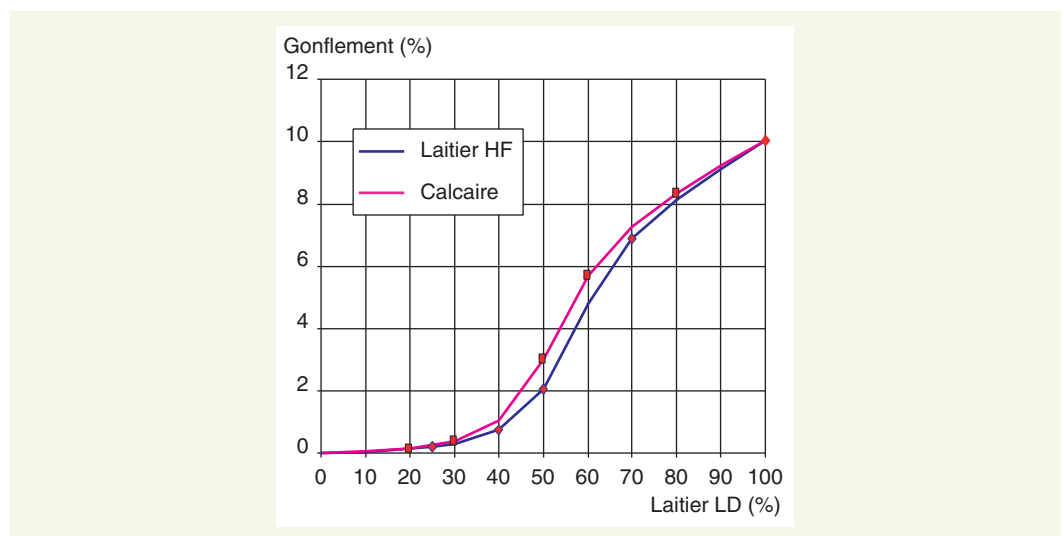
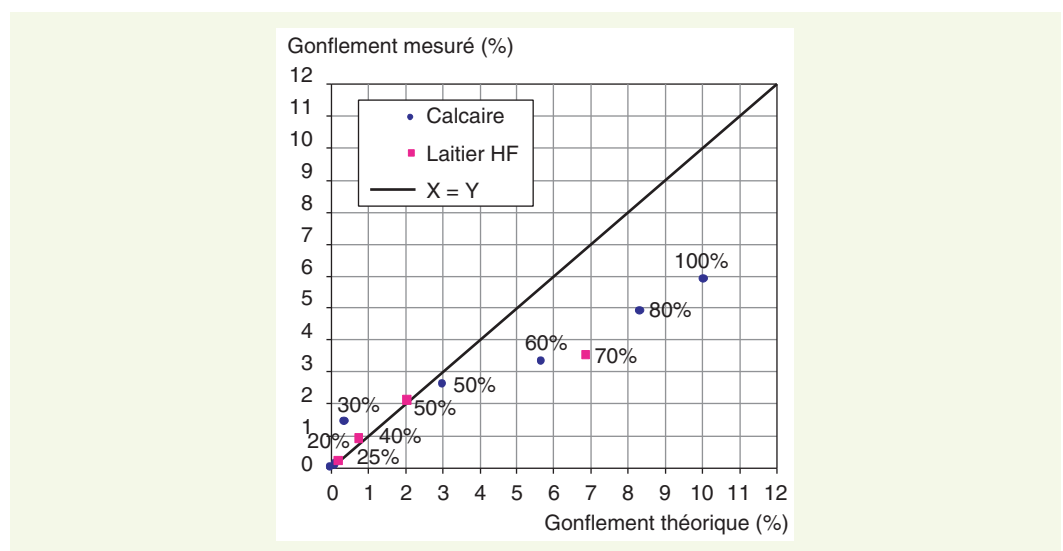


figure 9
 Comparaison entre gonflement théorique et gonflement mesuré pour des mélanges comprenant de 0 à 100 % de laitier LD 0/10 mm.



– lorsqu'on atteint le maximum de compacité avant maturation (ce qui correspond dans nos deux cas à 50 % de laitier LD), on change de comportement : les petits grains combler les interstices du squelette granulaire dominant, et la perméabilité est trop faible pour que la vapeur puisse irriguer l'ensemble du mélange. Elle ne va donc intéresser qu'une partie du volume, d'autant plus faible que l'on ajoutera encore du laitier LD. On retrouve alors le comportement prévu par la loi de mélange

classique : le gonflement évolue désormais sur une droite liant le point de compacité maximale, et celui correspondant à 100 % de laitier LD.

Ce modèle « mixte » a l'avantage d'expliquer les essais (à l'exception du point 30 % LD/70 % calcaire), et de montrer que René-LCPC [17] se place le plus souvent en sécurité par rapport aux mesures de laboratoire. Dans la réalité, on peut penser que sur le très long terme, des mélanges à 100 % de laitier LD finiraient par s'hydrater, si ce n'est complètement, du moins davantage que lors de notre vérification expérimentale.

CONCLUSIONS

On s'est intéressé dans cette étude à une méthode de formulation de mélanges composés de laitiers LD et de granulats inertes (un laitier de haut fourneau cristallisé et un calcaire), permettant d'envisager la confection de mélanges à gonflement contrôlé.

A partir de trois paramètres mesurés sur des fractions serrées de chaque matériau (granulométrie, masse volumique réelle et compacité), le logiciel René-LCPC permet de calculer le gonflement théorique d'un mélange composé de laitier LD 0/10 mm de fraîche production avec un granulats 10/20 mm inerte, en fonction de la proportion de laitier LD 0/10 mm : les valeurs théoriques calculées varient de 0 % de gonflement pour 0 % de laitier LD à 10 % de gonflement pour 100 % de laitier LD. Ce gonflement se traduit par une augmentation de la porosité du mélange.

Ces simulations montrent que les valeurs théoriques sont sensiblement les mêmes pour le laitier cristallisé HF et pour le calcaire. Elles montrent aussi que pour respecter la limite admise pour une utilisation en couche de fondation (gonflement maximum de 5 %), les mélanges ne devraient pas dépasser 60 % de laitier LD 0/10 mm. Cependant, la limite des 5 % ne s'applique qu'à des laitiers purs obéissant à une distribution de Fuller.

D'une façon générale, on manque encore d'éléments pour fixer un seuil de gonflement en laboratoire conduisant à des comportements satisfaisants pour des mélanges laitiers LD/granulats inertes, hors distribution de Fuller.

Dix tests expérimentaux d'expansion ont été réalisés avec des proportions de laitier LD allant de 20 à 100 %. Ces tests ont montré que, pour les mélanges avec moins de 50 % de laitier LD, le modèle d'empilement compressible, implémenté dans René-LCPC, propose une méthode de formulation aboutissant à une bonne prévision des gonflements expérimentaux.

Par contre, lorsque le mélange contient plus de 50 % de laitier LD, les valeurs mesurées sont nettement inférieures à la théorie, avec un écart qui s'accroît avec la proportion de laitier LD. Ce phénomène pourrait être le résultat d'une hydratation partielle du laitier LD, car il apparaît qu'avec l'augmentation des particules fines, la vapeur ne traverse plus la totalité du volume de l'échantillon, mais emprunte des chemins préférentiels.

Si la méthode de modélisation numérique a pu dans l'ensemble être validée pour les mélanges présentant moins de 50 % de laitier LD 0/10 mm, il reste nécessaire, pour une application en assise de chaussée, d'étudier le comportement géotechnique de ces mélanges, par des essais TCR notamment (essai triaxial à chargements répétés), et d'envisager des tests de mise en œuvre sur des chantiers expérimentaux.

En fonction des besoins de valorisation, cette méthode pourrait également permettre de formuler des mélanges peu gonflants, faisant appel à d'autres fractions granulaires de laitier LD.

Cette étude ouvre donc des perspectives prometteuses pour l'utilisation du laitier LD de fraîche production dans la construction routière, en limitant les risques de dégradation des structures consécutives aux gonflements des laitiers LD.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient le Comité technique pour la promotion des laitiers (CTPL) pour avoir financé la présente étude et en permettre la publication des principaux résultats.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- 1 ATS/CTPL. *Enquête nationale ATS/CTPL 2004 : Flux pour l'année 2004*. 2005. p. 7.
- 2 GOLDRING D.C., JUCKES L.M., Petrology and stability of steel slags. *Ironmaking and Steelmaking*, 1997. 447-456.
- 3 VERHASSELT A., CHOQUET F., La stabilité dimensionnelle des scories LD. *La technique routière*, 1985, 4-23.
- 4 NF EN 13043. *Granulats pour mélanges hydrocarbonés et pour enduits superficiels utilisés dans la construction des chaussées, aérodromes et d'autres zones de circulation*. *Afnor*, août 2003, paragr. 4.3.4.3.
- 5 NF EN 13242. *Granulats pour matériaux traités aux liants hydrauliques et matériaux traités utilisés pour les travaux de génie civil et pour la construction de chaussées*. *Afnor*, août 2003, paragr. 6.4.2.1.
- 6 XP P 18-545. *Granulats – Eléments de définition, conformité et codification*. *Afnor*, 2004.
- 7 NF EN 1744-1. *Essais pour déterminer les propriétés chimiques des granulats, Partie 1 : Analyse chimique – Détermination de l'instabilité des laitiers de hauts fourneaux et d'aciéries – Détermination de l'expansion de scories d'aciéries*. *Afnor*, 1998, paragr. 19.3
- 8 Motz, Geiseler, Products of steel slags an opportunity to save natural resources. *Waste Management*, 2001, 285-293.
- 9 AURIOL J.C., RAYSSAC E., PLATRET G., LEDÉE V., Étude du vieillissement accéléré par arrosage du laitier LD de Dunkerque. *Nantes : Laboratoire central des ponts et chaussées*, 2005, 88.
- 10 RAYSSAC E., LEDÉE V., DE LARRARD F., Étude de formulation des mélanges laitier LD/granulats inertes – Caractérisation des matériaux, Rapport intermédiaire du LCPC pour le compte du CTPL. *LCPC Nantes*, 2005, p. 27.
- 11 RAYSSAC E., LEDÉE V., DE LARRARD F., DENELEE D., Étude de formulation des mélanges laitier LD/granulats inertes – Étude et formulation des mélanges. *LCPC Nantes*, 2005.
- 12 NF EN 933-1 Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats – Partie 1 : Détermination de la granularité. Analyse granulométrique par tamisage. *Afnor*, 1997.
- 13 NF EN 1097-2. Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats – Partie 2 : Méthodes pour la détermination de la résistance à la fragmentation. *Afnor*, 1998. p. 33.
- 14 NF EN 1097-1. Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats – Partie 1 : Détermination de la résistance à l'usure (micro-Deval). *Afnor*, 1996. p. 13.
- 15 NF EN 1097-6. Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats, Partie 6 : Détermination de la masse volumique réelle et du coefficient d'absorption d'eau – Méthodes au pycnomètre. *Afnor*, 2001, paragr. 8 et 9.
- 16 BOUDONNET J.Y., La caractérisation « chimique » : une étape indispensable. *Panorama des connaissances. Laitiers sidérurgiques* 1994, 79, 27-46.
- 17 SEDRAN T., DE LARRARD F., René-LCPC – Un logiciel pour optimiser la granularité des matériaux de génie civil. *Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, 1994.
- 18 NF EN 13285. *Graves non traitées – Spécifications*. *Afnor*, 2003.
- 19 LEDÉE V., DE LARRARD F., SEDRAN TH., BROCHU F., Essai de compacité des fractions granulaires à la table à secousses : Mode opératoire. *LCPC Nantes*, 2004.