

LAITIERS sidérurgiques

N°111

Juin 2019

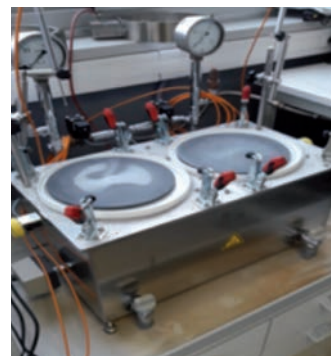
page 6

Actualaitiers

page 10

Expansion volumique :

Vers un meilleur contrôle



page 20

GRANULATS DE LAFE

**Des perspectives
en béton**

CTPL

CENTRE TECHNIQUE
ET DE PROMOTION
DES LAITIERS SIDERURGIQUES

ecart



LAC : il en va de leur avenir !

Depuis 2014, le CTPL s'est essentiellement mobilisé sur les contraintes législatives induites par les nouveaux textes liés à l'environnement et, en particulier, sur l'incidence des notions de « déchet », « sous-produit » et « substance » pour les laitiers sidérurgiques, ainsi que sur leur caractérisation environnementale et sanitaire afin d'assurer la pérennité d'usages souvent plus que centenaires.

Depuis le Ministère de l'Environnement (MTES) a reconnu que les laitiers de haut-fourneau granulés ne sont pas des déchets mais bien des substances (mars 2016), et la soumission du dossier de sortie du statut de déchet pour les laitiers sidérurgiques employés dans la construction des ouvrages routiers et de certains ouvrages de BTP est en cours d'instruction (à la date de la rédaction de cet éditorial). Ce dossier permettra, nous en sommes confiants, de dissiper les frilosités environnementales souvent liées à la terminologie « déchet » et les contraintes administratives qui y sont attachées. Aussi, il nous appartient maintenant de lever certaines contraintes techniques afin de développer de nouveaux usages.

C'est le cas pour les laitiers d'aciérie de convertisseur (LAC, également dénommés laitiers LD ou laitiers BOF) dont l'expansion, souvent aléatoire, et les difficultés à la prévoir et à la quantifier, ont créé une méfiance compréhensible des maîtres d'œuvre et des maîtres d'ouvrages à leur endroit, et ainsi freiné, pour ne pas dire proscrit leur prescription pour la construction des ouvrages routiers ou de BTP, malgré des performances très intéressantes.

Par conséquent, les articles présentés dans ce nouveau numéro de notre revue sont largement consacrés à cette problématique à laquelle le CTPL a décidé de s'attaquer.

Tout d'abord en présentant les conclusions d'un stage réalisé avec la collaboration de l'Ecole des Mines de Douai et du laboratoire de R&D d'Eiffage, et consacré à la mesure de l'expansion des laitiers et aux différentes méthodes employées tant en Europe qu'à l'international avec, pour objectif ultime, la mesure en laboratoire et dans des délais courts, d'une expansion identique à celle pouvant se produire sur le terrain. En effet, une mesure fiable de l'expansion des laitiers d'aciérie est la condition *sine qua non* pour en développer les usages et, en particulier, celui de granulats pour la fabrication de béton.

Le deuxième article consacré à cet usage montre bien l'intérêt de développer cette filière car les bétons de laitiers présentent des caractéristiques physiques (densité) et mécaniques (résistance) tout à fait intéressantes et dont il serait dommage de se priver.

Et même si l'été et les vacances ne sont pas forcément propices à la lecture de ce type de littérature, j'espère que vous prendrez le temps de lire (et d'apprécier !) ce nouveau numéro de notre revue.

Jacques Reynard
Président du CTPL



Expansion volumique : vers un meilleur contrôle

L'expansion volumique des laitiers d'aciérie a été identifiée depuis plusieurs années comme la pathologie la plus significative quant aux usages ce type de matériaux.

Derrière l'expansion volumique, il y a plusieurs réalités :

- Le type de laitier : haut-fourneau, convertisseur, filière électrique,
- La cause : présence de composés expansifs comme la chaux, la magnésie,
- La sinistralité : en fonction du type d'ouvrage.

Cet article s'appuie sur le travail de fin d'étude de Chen LIN au sein du CTPL. Il a permis de faire un état des lieux des essais pratiqués pour évaluer l'expansion volumique des laitiers. Les données recueillies dans la littérature permettent de recenser plusieurs types d'essais : conditions opératoires, choix des matériaux, ... Une partie pratique en laboratoire a permis de mettre en évidence les différences de comportement en faisant varier certaines conditions opératoires, comme la pression et la température. L'objet de cet article est de proposer des pistes de travail pour approfondir le sujet.

Pascal Leconte - CTPL

Chen LIN - Ecole des Mines de Douai

Granulats de LAFE : des perspectives en béton !



Le béton hydraulique est un matériau de construction très largement employé en France et dont les applications consomment le tiers des 330 millions de tonnes de granulats produites annuellement.

Pendant de nombreuses années, les producteurs de béton se sont approvisionnés en granulats dans les carrières et sablières alluvionnaires. La raréfaction de cette ressource, couplée aux progrès de la maîtrise des formules béton, a conduit à consommer davantage de matériaux issus de roches massives.

En parallèle, l'existence en France d'aciéries de four électrique a permis de mettre sur le marché des granulats de LAFE (Laitier d'Aciérie de Four Electrique) aux propriétés compatibles avec un usage en génie civil.

Les premières expériences dans différents pays ont montré que l'emploi de granulats de LAFE dans les bétons était possible, mais que cette ressource alternative nécessitait des études approfondies afin de cerner les spécificités et les limites d'emploi.

*Pascal Leconte - CTPL
I. Moulin, E. Perin - LERM*

LAITIERS SIDERURGIQUES

73^{ème} année

Revue éditée et diffusée
gratuitement par le CTPL

Directeur de la publication

Jérémie DOMAS,
Délégué Général

Rédacteur en chef

Pascal LECONTE,
Directeur

Rédaction

CTPL
Site ArcelorMittal de Fos
Aile 2 - Bureau 130
13776 Fos-sur-Mer cedex

Siège social du CTPL

6, rue André Campra
Immeuble Le Cézanne
93212 La Plaine
Saint-Denis cedex
www.ctpl.info

Conception - Réalisation

BC Consultants :
01 30 74 09 00

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

Crédit photos : CTPL,
AdobeStock

N° ISSN 1166 - 3138

Dépôt légal :

1^{er} semestre 2019

Fonctionnement du CTPL

Réunion du CA et de l'AG du CTPL

Les dernières réunions du Conseil d'Administration (CA) et de l'Assemblée Générale du CTPL se sont tenues le mardi 9 avril 2019 au siège du CTPL à Saint Denis. Cela a été l'occasion de faire un point d'avancement avec nos Administrateurs et l'ensemble de nos Adhérents sur les actions techniques, réglementaires et normatives réalisées au cours de l'année 2018, et de proposer les principaux axes de travail et pistes de réflexion, ainsi que les aspects budgétaires envisagés pour l'exercice 2019. La prochaine réunion du Conseil d'Administration se tiendra au mois de novembre 2019.

Nouvelle adhésion au CTPL

Lors de cette dernière réunion de l'Assemblée Générale, qui s'est tenue le 9 avril dernier, la validation à l'unanimité de l'adhésion de la société SOLODET (Société Lorraine d'Exploitation de Terrils) a été acceptée à partir de 2019.

SOLODET a été créée en 1975, avec comme principale activité la valorisation des schistes houillers. Son siège est à Woippy (57). Depuis, la société, intégrée dans le giron du groupe Eurovia, a développé son activité de négoce en Lorraine avec des gisements en France, en Belgique et en Allemagne. Elle intervient sur le segment des laitiers sidérurgiques en étroite collaboration avec la SLAG et sur le site sidérurgique de Dillinger en Sarre. Elle possède une longue expérience de la valorisation des laitiers sidérurgiques dans le Nord Est avec des applications variées (routes, terrassements, plates formes industrielles).

Nous sommes ainsi très heureux d'accueillir SOLODET au sein du CTPL et souhaitons une fructueuse collaboration pour les prochaines années.



International

Conseil d'Administration d'EUROSLAG

Au cours du premier semestre 2019, plusieurs réunions du Conseil d'Administration d'EUROSLAG se sont tenues : le mardi 26 février et le mercredi 15 mai 2019 au siège du FEHS de Duisburg. L'objectif était de réunir les Administrateurs et experts pertinents afin d'échanger sur les principes de base d'une réorganisation technique, administrative et financière pour optimiser les actions d'EUROSLAG, et de faire une proposition motivée à l'ensemble des membres de l'Association lors de la prochaine Assemblée Générale de novembre 2019 à l'ensemble des Membres de l'association. M. Jérémie DOMAS y a participé afin de faire valoir l'expérience du CTPL et l'approche que la France soutiendrait.

Réunion des Groupes de Travail d'EUROSLAG

Une réunion des adhérents de l'Association européenne des producteurs et opérateurs de laitiers sidérurgiques, EUROSLAG, s'est tenue le jeudi 16 mai 2019 au FEHS à Duisbourg. Ce fut l'occasion

pour le CTPL de faire le point avec l'ensemble des acteurs européens de la profession des laitiers sur les problématiques normatives et réglementaires, et aussi d'échanger sur les actions techniques en cours au sein des Etats Membres de l'UE.

Conférence EUROSLAG

La 10^{ème} conférence européenne sur les laitiers, organisée par EUROSLAG, se tiendra en Grèce à Thessalonique du 9 au 11 octobre 2019. Elle sera organisée en partenariat avec le Centre de recherches universitaires Aristote de Thessalonique et l'entreprise AEIFOROS, spécialisée dans la valorisation des co-produits industriels.

Un rendez-vous à noter dès à présent dans vos agendas, afin de venir partager vos expériences et rencontrer la communauté des experts internationaux impliqués dans la gestion et la valorisation des laitiers sidérurgiques.

A cette occasion, le CTPL présentera une publication et un poster pour promouvoir les actions menées en France par la profession au cours de ces dernières années.

www.euroslag.com

Réglementation nationale et européenne

Statut juridique des laitiers sidérurgiques

Depuis la publication de notre dernier numéro (N°110, décembre 2018) de la revue Laitiers Sidérurgiques, le CTPL continue de suivre de très près avec l'Administration les différents dossiers dans le cadre de la modification du statut juridique de déchet des laitiers sidérurgiques.

La modification du statut juridique des constituants utilisés pour la fabrication de matières fertilisantes, en particulier en tant qu'amendements minéraux basiques (laitiers d'aciérie de conversion), est en cours d'évolution et a été prise en compte par l'article 95 de la Loi EGALIM (suite aux travaux des Etats généraux de l'Alimentation). Les réflexions sont en cours entre les services des Ministères de l'Agriculture et de l'Environnement, avec le support de l'ANSES.

Enfin, le dossier déposé en mai 2016 concernant la sortie du statut de déchet (SSD) pour les laitiers de haut-fourneau cristallisés et les laitiers d'aciérie (filiales convertisseur et électrique) utilisés en technique routière et en travaux publics a été amendé et une version révisée du projet d'arrêté ministériel définissant les conditions et les critères de SSD des laitiers utilisés pour ces usages est en cours de consultation. Après une instruction longue et complexe, les services instructeurs du MTES et l'ensemble de la profession semblent donc être prêts et motivés pour que le statut juridique des laitiers sidérurgiques puisse enfin évoluer dans le respect et la continuité des principes mêmes de la politique nationale sur l'Economie Circulaire (FREC).

SRC - Schémas régionaux des carrières

Les régions françaises ont l'obligation de mettre en place d'ici 2020 leurs schémas des carrières incluant les ressources minérales secondaires (ou « alternatives »). A cette fin, les laitiers sidérurgiques sont intégrés dans le processus pour les régions concernées. La plupart des régions ont ainsi bien avancé grâce à l'aide des principales parties prenantes. Le CTPL participe à ces réunions et représente la profession, en particulier pour la région Auvergne Rhône-Alpes (AuRA), la région PACA, la région des Hauts-de-France, ainsi que dans la région du Grand Est. Avec l'échéance de 2020 qui se rapproche à grand pas, les réunions et les actions se multiplient en 2019, afin d'avancer dans l'élaboration des différents SRC.

Guide méthodologique pour l'utilisation en construction

Le guide d'utilisation des matériaux alternatifs en construction (GAMAC), piloté par le CEREMA, arrive à une étape décisive. Les différentes parties prenantes ont fait part de leurs observations sur une première version projet du guide. Pour sa part, le CTPL a rencontré le CEREMA le 5 février et, à cette occasion, il a pu porter les remarques de la profession, en lien avec la procédure de sortie de statut de déchet, le marquage CE, les taux d'incorporation et les flux transfrontaliers.

Lors d'une nouvelle réunion plénière au MTES tenue le 11 mars devant tous les intervenants, le CEREMA a annoncé la prise en compte de certaines remarques et la communication d'une deuxième version du projet de guide avant les congés d'été 2019. Nous restons en attente de ce prochain document, qui nous analyserons en concertation avec nos Adhérents et les autres représentants professionnels impliqués.

Révision du Règlement européen n° 2003/2003 sur les fertilisants

La version finale du projet de Règlement européen sur les fertilisants a été présenté en décembre 2018, et voté par le Parlement le 27 mars 2019. L'acceptation définitive par le Conseil est maintenant attendue d'ici la fin du mois de mai, et la publication du Règlement au journal officiel (JOUE) avant la fin du mois de juin 2019.

Une période de trois ans démarrera alors avant l'application effective de cette réglementation, au cours de laquelle les producteurs pourront encore commercialiser les stocks de fertilisants disponibles, et se préparer à une mise en conformité avec cette nouvelle réglementation et la mise sur le marché de fertilisants marqués CE.

La publication du rapport du JRC « STRUBIAS » (struvite, biochars et cendres) est également attendue à la même période, ce qui permettra à la Commission Européenne de lancer le processus de comitologie qui permettra de valider les annexes et d'intégrer des matériaux secondaires dans le Règlement.

Le 10 mai dernier, le groupe de travail européen sur les fertilisants s'est tenu à Bruxelles, et a permis, en particulier, d'aborder la question de la déclinaison de la CMC 11 pour les sous-produits industriels. EUROSLAG et EUROFER préparent actuellement un dossier proposant des critères d'intégration pour les laitiers sidérurgiques dans cette catégorie.

Pour plus d'informations sur la version de cette réglementation, vous pouvez consulter le lien : www.europarl.europa.eu/sides/getDoc.do?pubRef=-//EP//NONSGML+TA+P8-TA-2019-0306+0+DOC+PDF+V0//EN

Normalisation

BN TEC - D.T.U. 13.3 - Dallages industriels

Depuis la fin de l'année 2018, les travaux ont essentiellement porté sur la réécriture de l'annexe A géotechnique, qui fixe les critères de choix des matériaux utilisés en couche de forme sous dallage. Les discussions ont été très animées, avec l'implication du BNTEC, le bureau de normalisation sectoriel. La criticité de cette annexe est telle que sa place dans le présent D.T.U. a dû faire l'objet d'une communication spécifique devant la Commission Nationale des Terrassements (CNT). Le D.T.U. va rentrer dans la phase de révision de la partie matériaux à proprement dit (Béton de dallage, Aciers) pour partir en enquête publique au second semestre 2019.

CEN/TC 51 - Ciment et liants hydrauliques

Bien que la nouvelle version du mandat M114 ait été acceptée et que la future réponse au mandat soit prête, les discussions entre le TC 51 et les consultants HAS sont toujours d'actualité. Il ressort que l'adoption de certaines normes est toujours bloquée et que cela indispose un nombre croissant de TC. Dans le cas du TC 51, nous retiendrons que la norme ciment EN 197-1 devrait paraître en fin d'année. Il existe un projet d'incorporation des fines de béton recyclé comme constituant secondaire du ciment, ce qui peut avoir des conséquences. Au niveau des liants routiers, l'inaction de l'animateur du WG14 commence à pénaliser sérieusement la publication de la EN 13282-2 et le marquage CE des produits qui en dépendent.

CEN/TC104 - Bétons

L'actualité est dominée par la révision des normes d'essais, la réactivation de certains groupes d'experts et par la possibilité pour la France de reprendre l'animation d'un groupe européen WG10 dédié aux bétons fibrés. Un Task Group spécifique (TG10) a été chargé de se pencher sur le cas de la norme béton EN 206-1 et sur les questions liées à sa conformité vis-à-vis des

règlements européens. Bien que n'étant pas harmonisée, elle se doit de respecter le principe de neutralité, en particulier pour la partie contrôle de réception et de production, ce qui n'est pas le cas aujourd'hui. Cette norme doit rentrer en révision à l'horizon 2020 - 2021. A noter qu'il existe un mandat pour les produits bétons préfabriqués, mais pas pour le béton prêt à l'emploi.

CEN/TC154 - Granulats

Dans le même ordre d'idée que pour la partie ciment, beaucoup de normes granulats sont bloquées pour des raisons de conformité au mandat et/ou au Règlement Produit de Construction (RPC). La norme d'attestation de conformité EN 12620 publiée fin 2018 n'est toujours pas d'application. Son rôle est important car c'est elle qui définit la conformité pour les usages routes, bétons, mortier, voies ferrées.

Pour la normalisation côté français, il faut noter l'existence du sous groupe dédié à la révision de la NF P18-545. Cette norme doit être adaptée pour tenir compte de l'évolution des textes européens. La position actuelle est de ne pas créer de nouvelle classe qui ne seraient pas définies auparavant dans une norme européenne. A noter également l'articulation de l'article 14 de cette norme avec la révision de la norme européenne EN 12620-1 sur les enrochements.

CEN/TC227 - Assises de chaussées

L'actualité pour les matériaux d'assises de chaussées est calme. Elle est dominée par le projet de fusion des normes de la série EN 14227 pour créer un seul texte intégrant toutes les possibilités des matériaux utilisés en traitement, dont les laitiers granulés de haut-fourneau. Au niveau des liens avec les autres TC, il faut signaler les travaux préliminaires pour l'intégration du volet substances dangereuses dans les matériaux de chaussées.

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

WG1 - Emission de SDR dans les eaux et les sols

La dernière réunion du WG1 s'est tenue au DIN à Berlin les 30 et 31 janvier 2019. Elle a permis de finaliser les conclusions de l'étude interlaboratoire de validation des normes de lixiviation (et d'analyse), présentée par le JRC/IPTS de la Commission Européenne. Le lancement de l'étude de validation pour les paramètres organiques est désormais en cours et se déroulera en 2019.

WG3 - Radioactivité des Produits de Construction

Les réunions des TG31 et TG32 se sont tenues au SIS de Stockholm les 13 et 14 mai dernier. Un projet de norme concernant l'évaluation de la dose de l'émission de rayonnement gamma est en cours d'élaboration. Les travaux de rédaction seront engagés après l'été, après avoir identifié les principaux paramètres et limites à prendre en considération pour une telle norme.

Un rapport technique est également en cours quant aux méthodes alternatives utilisables pour quantifier les concentrations d'activité des radioéléments ²²⁶Ra, ²³²Th et ⁴⁰K par spectrométrie de rayons gamma (γ).

CEN/TC396 - Terrassements

Au niveau des terrassements, les principales avancées portent sur la révision du GTR et sur les travaux du groupe européen TC396/WG7 dédié aux matériaux alternatifs en terrassement. Les travaux de révision du GTR ont pour objectif l'édition d'une version projet du guide pour fin 2019. Pour le groupe de travail européen, la rédaction d'un Technical Report (TR) basé sur les expériences avérées en termes de matériaux alternatifs doit permettre d'illustrer les retours d'expérience. Il y a quasiment une congruence entre notre implication dans le GTR et le groupe européen en ce qui concerne les laitiers comme sur la plupart des matériaux abordés. Il faut également noter la révision de la norme NF P11-300, rendue nécessaire par la révision du GTR et dont elle est quasiment indissociable.

Communication

IDRRIM

Les Journées Techniques de la Route (JTR) qui se sont tenues à Nantes en février 2019 ont permis de présenter un retour d'expérience sur le guide (SETRA, octobre 2012) relatif à l'emploi des laitiers en tant que matériau alternatif en technique routière. Il faut à ce titre garder en mémoire que notre demande de révision de ce guide auprès du Ministère reste toujours d'actualité. Le Groupe Spécialisé (GS) sur les matériaux granulaires a poursuivi son travail d'instruction de guides régionaux (Pays de Loire, Normandie) ou thématiques (sable de fonderie, sédiments) dans le cadre des activités du comité Avis.

Le site Internet du CTPL se modernise

En réponse aux évolutions techniques et afin de rendre son site Internet facilement consultable, même en situation de mobilité (smartphone, tablette), le CTPL propose à compter de ce mois de juin une version « modernisée », responsive et sécurisée de son site www.ctpl.info.

Même si le CTPL veille régulièrement à son actualisation et son enrichissement, ce projet a également été l'occasion d'un « toilettage » complet du site.

Résultat, un site Internet très complet, plus ergonomique, avec toujours une section réservée exclusivement aux membres du CTPL.

N'hésitez pas à y jeter un oeil !

Formation

Le CTPL poursuit en 2019 son engagement dans les travaux de R&D avec un autre sujet de stage. Depuis février 2019, Cédric Bouallag, élève ingénieur à Chimie Lille, travaille sur la valorisation des déblais d'excavation grâce aux laitiers sidérurgiques.

Ce sujet vise particulièrement à étudier le cas des déblais en grande fouille comme ceux du Grand Paris sous l'angle particulier de la problématique des sulfates. Cette étude, réalisée en partenariat avec des laboratoires extérieurs, a pour objectif de cerner l'apport de certains laitiers dans le traitement de matériaux argileux et la résistance aux gonflements ettringitiques.

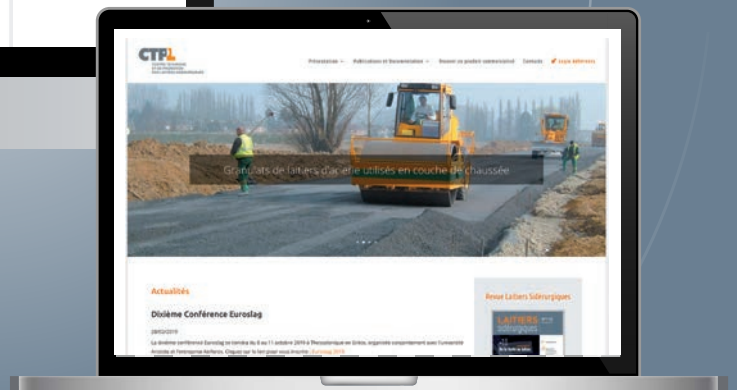
Le site internet du CTPL se modernise !

www.ctpl.info

Facile d'accès depuis votre PC,
votre tablette ou votre smartphone

Plus ergonomique

Riche et régulièrement
actualisé



Expansion volumique : vers un meilleur contrôle



L'expansion volumique des laitiers d'aciérie a été identifiée depuis plusieurs années comme la pathologie la plus significative quant aux usages ce type de matériaux.

Derrière l'expansion volumique, il y a plusieurs réalités :

- Le type de laitier : haut-fourneau, convertisseur, filière électrique,
- La cause : présence de composés expansifs comme la chaux, la magnésie,
- La sinistralité : en fonction du type d'ouvrage.

Cet article s'appuie sur le travail de fin d'étude de Chen LIN au sein du CTPL. Il a permis de faire un état des lieux des essais pratiqués pour évaluer l'expansion volumique des laitiers. Les données recueillies dans la littérature permettent de recenser plusieurs types d'essais : conditions opératoires, choix des matériaux, ...

Une partie pratique en laboratoire a permis de mettre en évidence les différences de comportement en faisant varier certaines conditions opératoires, comme la pression et la température. L'objet de cet article est de proposer des pistes de travail pour approfondir le sujet.

Contexte d'emploi des laitiers

Le véritable essor d'emploi des laitiers en France correspond à la deuxième moitié du XX^{ème} siècle. Cette période se caractérise par des besoins importants en matériaux pour les travaux de construction d'infrastructures : routes, voies ferrées, aéroports.

Dans les régions industrielles (Nord et Est de la France), la disponibilité des coproduits industriels alliée à un manque relatif de certains matériaux naturels ont favorisé l'emploi des laitiers en particulier ceux issus des hauts fourneaux et des convertisseurs de la filière fonte.

Le laitier de haut-fourneau cristallisé a connu une amélioration qualitative depuis l'origine. Les aspects liés à sa stabilité volumique (désintégration du fer et du silicate bicalcique) ont été résolus et ont conduit à l'obtention d'un composé stable. Les normes granulats route et béton ont cependant conservé des tests de contrôle pour garantir sa qualité. Il n'en a pas été de même pour le laitier d'aciérie de convertisseur. Son potentiel de gonflement a été rapidement mis en évidence.

En soi, le gonflement est juste une caractéristique physique. C'est la mise en œuvre d'un matériau gonflant dans des ouvrages fermés ou recouverts qui peut conduire à des sinistres. Si dans certains cas, les gonflements n'ont pas de conséquences (talus, buttes paysagères), dans d'autres cas ils peuvent se révéler problématiques avec dans le pire des cas la ruine de l'ouvrage et son incapacité à être exploité dans de bonnes conditions.

Les entreprises et les laboratoires qui ont participé à la mise en œuvre des laitiers sidérurgiques se sont toujours attachés à décrire à travers des essais et des normes les valeurs limites en fonction des usages qu'il convenait de ne pas dépasser dans le cadre d'un ouvrage précis.

Une des données majeures pour la détection du potentiel de gonflement est le temps. Dans l'ouvrage, le gonflement peut se déclarer au bout de quelques jours, quelques semaines voire quelques mois ou années.

L'obtention de ces résultats en laboratoire est rarement compatible avec la durée d'exécution du chantier et la mise en service de l'ouvrage. La question a donc été de concevoir des essais accélérés, capable de rendre compte dans un délai raisonnable de la potentialité d'un gonflement quelconque. Compte tenu du type d'essai et de la méthode de détection du gonflement, il n'a par contre pas été possible de relier une valeur d'expansion mesurée en laboratoire à un pourcentage de variation volumique observé en réalisation.

Comme le facteur déclenchant le gonflement est l'eau, les deux grandes familles d'essais considèrent respectivement :

- l'eau liquide,
- l'eau sous forme vapeur.

Si historiquement, la Belgique et les Pays-Bas ont utilisé des tests mettant en œuvre l'eau sous forme liquide, la norme européenne (d'application en France notamment) donne la préférence à l'eau sous forme de vapeur. Toutefois afin de circonvenir les problèmes liés à cette norme, certaines entreprises françaises mettant en œuvre des laitiers sidérurgiques ont développé leurs propres essais et procédures d'acceptation.

ESSAI		EUROPE/FR EN1744	FR1	FR2	FR3	US1 ASTM	US2	BE1 CRR	BE2	NL
Eau	Liquide					Liq		Liq	Liq	Liq
	Vapeur	vapeur	vapeur	vapeur	mixte		vapeur			
Température en °C		100	100	135		70	216	50	40	100
Pression		atm	atm	2.5 bars		Atm	2.05 MPa	Atm	Atm	Atm
Echantillon	Naturel		naturel							
	Corrigé					correction	correction	correction		correction
	Reconstitué	Fuller		Fuller					GB	
Appareil		spécifique	autoclave	autoclave	CBR / autoclave	moule	autoclave	immersion	cellule	Nc
Durée		24 h / 1 sem	< 24 h	6h30		7 jours	24 h	28 jours		8 h
Résultat	Hauteur	mm	mm	mm		mm	mm	mm	mm	
	Masse							M		M
Formule de calcul		% volume					% volume	mixte		% masse
Référence	Norme	X				X		X	X	X
	Entreprise		X	X	X		X			

Tableau 1
Principales sources de données nationales et internationales et conditions des essais pratiqués

Le tableau 1 regroupe les principales sources de données sur les essais actuellement pratiqués. Les têtes de colonne font référence au pays où l'essai est pratiqué ou au corpus documentaire.

Les photos suivantes (figures 1 à 3) présentent dans leur ensemble les dispositifs utilisés par certaines de ces entreprises.



Figure 1



Figure 2

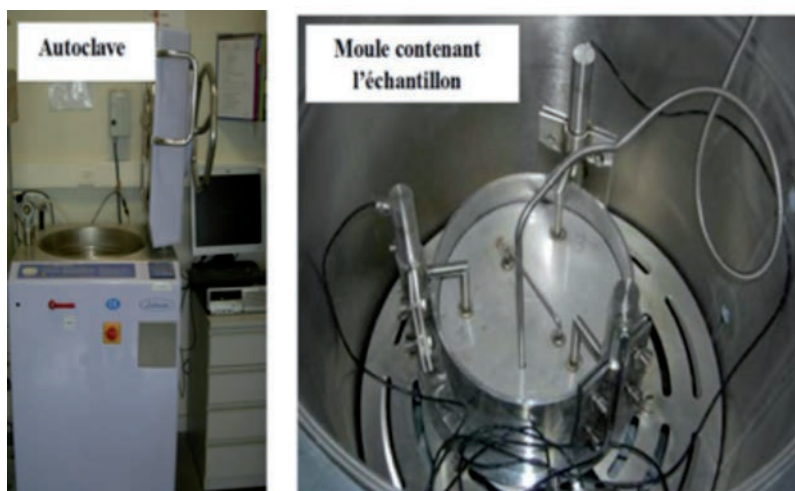


Figure 3

Causes de l'expansion - Mesure et prévention

Certains types de laitiers contiennent deux minéraux en quantités variables susceptibles d'engendrer des réactions d'expansion et par la-même des gonflements observables. Il s'agit :

- de l'oxyde de calcium sous forme anhydre CaO, appelée communément chaux vive,
- de l'oxyde de magnésium sous forme anhydre MgO, connu aussi sous le nom de Périclase.

Les principales réactions sont les suivantes :

Dans le procédé particulier de conversion, la fonte est versée liquide dans un convertisseur, puis de l'oxygène est soufflé pour brûler le carbone en excédent. La chaux est injectée au moyen de cette même lance et permet de débarrasser l'acier de certains composants minéraux (silice, alumine, phosphore, soufre), qui se retrouvent alors dans le laitier avec l'excédent de chaux non mobilisé par ces réactions. Celui-ci peut contenir des quantités de chaux vive significatives qui sont disponibles pour une hydratation ultérieure et provoquer des gonflements potentiels (figure 4).

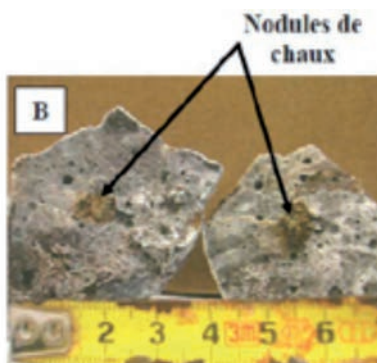
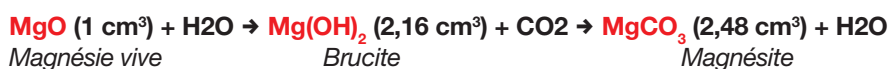


Figure 4

- Chaussée endommagée par le gonflement de laitier LD (A).
- Observation de nodules de chaux dans des granulats (B) [da Silveira et al., 2005 ; Auriol, 2004]

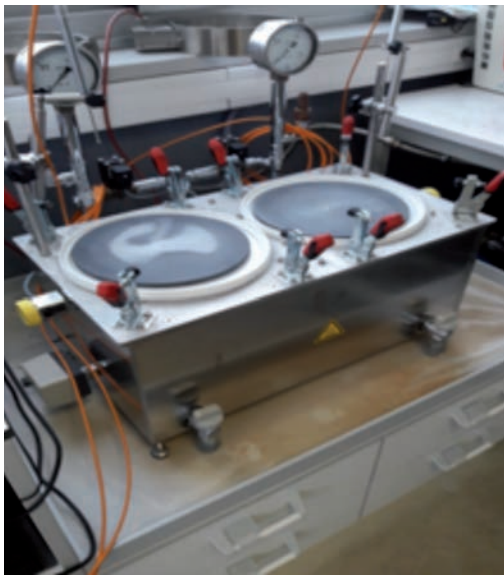


Figure 5
Vue d'un appareil de laboratoire permettant
de mesurer l'expansion volumique de deux
échantillons simultanément selon la norme
NF EN 1744-1

Les autres types de laitiers (haut-fourneau, aciérie électrique) ne sont pas concernés dans les mêmes proportions par le phénomène, car même s'il y a de l'oxyde de calcium présent dans ces matériaux, celui-ci se retrouve combiné dans d'autres minéraux présents dans le laitier (C2S, C3S, C4AF) et n'est donc pas disponible pour s'hydrater. L'essai de référence utilisé dans les normes granulats françaises et européennes est l'essai d'expansion à la vapeur dit « Steam Test », décrit dans la norme NF EN 1744-1. C'est un essai réalisé au moyen d'un dispositif spécifique où l'échantillon de laitier est soumis à de la vapeur d'eau (figure 2). Au bout d'une échéance normalisée, on mesure l'expansion de l'éprouvette de laitier.

- L'essai recèle quelques particularités :
- en fonction de la teneur totale en oxyde de magnésium MgO (indépendamment de sa forme libre ou combinée), il dure 24 h si $MgO < 5 \%$ et une semaine si $MgO > 5 \%$,
 - l'échantillon de laitier est reconstitué selon une courbe théorique dite « de Fuller » avec des répartitions granulométriques précises,
 - la vapeur est générée en continu à pression atmosphérique, ce qui oblige à avoir une circulation d'eau et une alimentation électrique en permanence pendant la durée de l'essai,
 - la mesure de l'expansion est réalisée par un capteur central situé au sommet de l'appareil qui donne une valeur correspondante à une déformation axiale.

En termes de valeurs limites, les normes granulats françaises et européennes ont retenu celles figurant dans le tableau 2 ci-dessous :

ASSISES DE CHAUSSÉES NF P 18-545 - ART 7		COUCHES DE ROULEMENT NF P 18-545 - ART 8	
Matériaux bitumineux NF EN 13043	GTLH / GNT NF EN 13242	Bétons bitumineux (BBSG, BBTM,...)	Enduits superficiels (ESU..)
Valeur limite 3.5 %	Valeur limite 5.0 %	Valeur limite 3.5 %	Valeur limite 6.5 %

Tableau 2
Valeurs limites fixées par les normes granulats françaises et européennes

Limites de l'essai, interprétations et alternatives

Même s'il est aujourd'hui communément admis et répandu, l'essai à la vapeur rencontre quelques limites :

- la spécificité de l'appareillage et le nombre réduit de dispositifs en France constituent un frein pour la disponibilité des contrôles,
- bien que l'essai, dans sa version courte, dure 24h, cela peut constituer un obstacle en termes de faisabilité et de surveillance au sein du laboratoire, cela est d'autant plus vrai si il dure 7 jours,
- le gonflement est mesuré par un seul capteur central au dessus de l'échantillon, ce qui peut conduire à sous-estimer le taux de gonflement si celui-ci est localisé sur un côté de l'éprouvette soumise à l'essai,
- l'essai est réalisé sur une courbe théorique et « reproductible » du matériau, ce qui ne correspond pas à la fraction réellement mise en œuvre sur un chantier,
- il n'existe pas de corrélation directe entre le

taux de chaux libre, le pourcentage de gonflement et une expansion macroscopique réellement observée sur chantier,

- l'influence de la magnésie demeure encore mal connue.

Afin d'aller plus loin dans l'analyse, nous avons réalisé une série de mesures sur trois échantillons de laitiers de convertisseurs, appelés également laitiers LD (pour Linz Donawitz, le nom du type de convertisseurs) issus des usines de Dunkerque et Fos-sur-Mer. Ces laitiers, issus de la fraîche production, ont été soumis à un ensemble de tests et d'analyses :

- composition chimique globale par Fluorescence X,
- mesure de la teneur en chaux libre ($\text{CaO} + \text{Ca(OH)}_2$) par essai Leduc,
- mesure de la teneur en magnésie libre selon un mode opératoire interne industriel,
- analyse minéralogique par DRX,
- mesure de l'expansion volumique selon deux procédés différents.

Pour plus de commodité, ils ont été notés L11 et L12 (Fos) et L2 (Dunkerque).

Composé	% Massique laitier L2*	% Massique laitier L11**	% Massique laitier L12**
Fe_2O_3	28,2	28,3	26,2
CaO	41,12	46,9	48,0
SiO_2	13,73	11,9	11,6
Al_2O_3	2,99	1,9	2,4
MgO	6,41	5,8	6,3
MnO	5,10	1,8	2,2
TiO_2	1,01	0,6	0,6
P_2O_5	1,53	1,6	1,6
K_2O	0,01		
SO_3		0,1	0,1
V_2O_5			0,2
CuO		Traces	Traces
SrO		Traces	Traces
Nb_2O_5		Traces	Traces
TOTAL	97,55	99,5	99,5
CR_2O_3	0,23	0,2	0,2

Tableau 3

Composition chimique mesurée par fluorescence X

* laitier L2 de Dunkerque, prélevé sur stock déporté de gravillons, ayant passé plusieurs années à l'air libre, donc plus vraiment de fraîche production

** laitiers L11 et L12 de Fos: laitiers de fraîche production, prélevés au moment de l'étude quelques jours auparavant sous la forme de grave 0/20 à une semaine d'intervalle entre L11 et L12

On peut constater (tableau 3) que ces trois laitiers sont chimiquement relativement proches avec pour les laitiers L11 et L12 un pourcentage en oxyde de calcium plus important, mais restant toutefois dans les gammes de teneur que l'on peut rencontrer sur ce type de composés dans l'industrie.

• Dosage de la chaux libre

La chaux libre est dosée par la méthode Leduc, qui repose sur une variante de l'acidimétrie d'une solution de saccharate de calcium (dite méthode au sucre).

L'utilisation d'une telle courbe granulométrique se justifie par l'obtention d'une compacité permettant à la vapeur de circuler librement à travers l'échantillon, pour éviter une montée en pression de l'enceinte. Cette répartition granulométrique diffère très significativement des courbes obtenues sur des graves naturelles. De plus, la compacité visée (taux de vide de 25 % ± 3) est difficile à obtenir en raison de la mise en place d'un matériau particulièrement frottant. Pour des questions de temps et de place disponible au niveau des appareils, il a été décidé de garder et de tester pour le site n°1 uniquement le laitier qui avait le taux de chaux libre le plus important.

Tableau 4
Dosage de la chaux libre

Echantillon	Avant le test de gonflement	Après l'essai à l'autoclave			Après l'essai au steam test NF EN 1744-1		
		Prise 1	Prise 2	Moyenne	Prise 1	Prise 2	Moyenne
L11	11,20%	10,20%	9,60%	9,90%	/	/	/
L12	11%	Non testé					
L2	2,10%	1,20%	1,40%	1,30%	1,20%	1,70%	1,45%

On peut noter que contrairement à ce que laisse apparaître le tableau 4 ci-dessus, le pourcentage en chaux libre est beaucoup plus important sur les échantillons L11 et L12.

• Résultats des essais d'expansion

Les matériaux sont préparés en suivant le principe de reconstitution d'une courbe théorique dite de Fuller. Elle répond à la répartition présentée dans le tableau 5 ci-dessous.

Tableau 5
Répartition pour reconstitution d'une courbe théorique dite de Fuller

Fraction	% Masse Fuller
0/0,5	15%
0,5/2	15%
2/5,6	19%
5,6/8	10%
8/11,2	11%
11,2/16	15%
16/22,4	15%

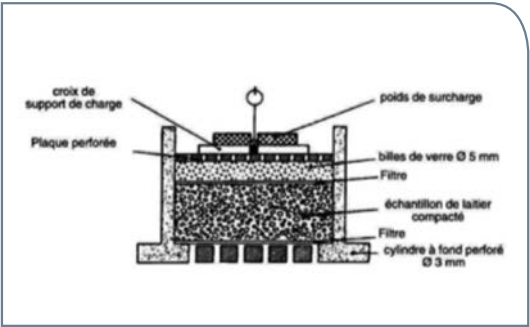


Figure 6
Vue en coupe d'un appareil Steam Test

Les tests réalisés sont de deux types (cf tableau 6) :

- un essai normalisé selon la NF EN 1744-1 dit « Steam test »,
- un essai à l'autoclave.

Ce deuxième essai, non normalisé, reprend le principe du Steam Test (figure 3) en apportant les modifications suivantes :

- l'appareil est un autoclave de type hospitalier, donc disponible dans le commerce,

- l'essai a lieu sous pression et à température élevée, ce qui modifie les cinétiques de réaction : 135°C et 0,25 MPa / 2,5 bars,
 - il y a trois capteurs répartis à 120 ° au sommet de l'échantillon au lieu d'un seul. La mesure de l'expansion est donc réalisée sur toute la surface,
 - la durée totale du test est de 6h30 et a été déterminée et optimisée dans l'entreprise concernée en réalisant des essais comparatifs steam test / autoclave sur plusieurs échantillons de laitier à différents teneurs en chaux libre.

* Remarque sur l'échantillon L2 :

Compte tenu de son absence de particules fines, il lui a été rajouté un correcteur minéral pour compléter les pourcentages définis dans la courbe théorique de Fuller. Ce minéral de substitution ne gonfle pas en présence d'eau liquide ou de vapeur et appartient à la famille des Porphyres (roches éruptives siliceuses).

		L11		L2 *	
		Prise 1	Prise 2	Prise 1	Prise 2
Steam Test NF EN 1744-1	24 h (mesure manuelle)	3,20%	4,00%	1,10%	0,60%
	MOYEN	3,60%		0,85%	
	24 h (mesure avec les sondes)	3,80%	4,80%	Coupure électrique	
	MOYEN	4,30%			
	48 h	L'essai est fini à 24h.		1,20%	1,40%
	MOYEN			1,30%	
Essai d'autoclave FR2	MOYEN	5,50%	4,00%	2,90%	2,90%
		4,75%		2,90%	

Tableau 6

Essais d'expansion selon la norme NF EN 1744-1 (Steam Test) et à l'autoclave (FR2)

Fraction	Masse (g)	% Masse final	% Masse Fuller	Changement
0/0,5	6880	19,98%	15%	➔
0,5/2	4073	11,83%	15%	➔
2/5,6	6917	20,08%	19%	➔ ➔
5,6/8	3272	9,50%	10%	➔ ➔
8/11,2	3891	11,30%	11%	➔ ➔
11,2/16	4829	14,02%	15%	➔ ➔
16/22,4	4579	13,30%	15%	➔ ➔
TOTAL	34441	100%	100%	-

Tableau 7

Répartition granulométrique avant et après essai - Echantillon L2

Echantillon	Avant le test de gonflement	Après l'essai de l'autoclave	Après l'essai du Steam Test
L11	0,6	non testé	
L2	<0,1	<0,1	non testé

Tableau 8

Analyse de la teneur en magnésium

La teneur en magnésie libre (tableau 8) est réalisée ici selon une méthode interne au laboratoire, par extraction et dosage par un spectromètre d'absorption atomique équipé d'une lampe au magnésium. Il y a une différence importante entre la teneur globale exprimée en MgO déterminée par fluo X et le magnésium réellement libre.

En matière de durée de l'essai, il aurait fallu aller jusqu'à 7 jours pour le Steam Test compte tenu du pourcentage de MgO déterminé par fluo X (> 5 %). Cela n'a pas été possible pour des contraintes liées à l'organisation du laboratoire. Si certains laboratoires estiment que la teneur en MgO libre est le facteur prépondérant dans le phénomène de gonflement, il est admis

d'assimiler pour des raisons pratiques la teneur en MgO libre à celle du MgO total pour la détermination de la durée de l'essai. Cependant, il semble donc que cela ne soit pas le cas.

Le dosage du MgO libre reste une méthode difficile et non normalisée dans ce type de matrice compte tenu de la compétition entre le Fe et le Mg pour les mêmes réactifs. A ce titre, il n'y a pas encore de méthode normalisée.

• Phases cristallines

Nous avons soumis les échantillons de laitier avant essai d'expansion à une analyse par diffraction X afin d'évaluer les phases cristallines en présence.

Figure 7
Diffractionnogramme
interprété
du laitier L11

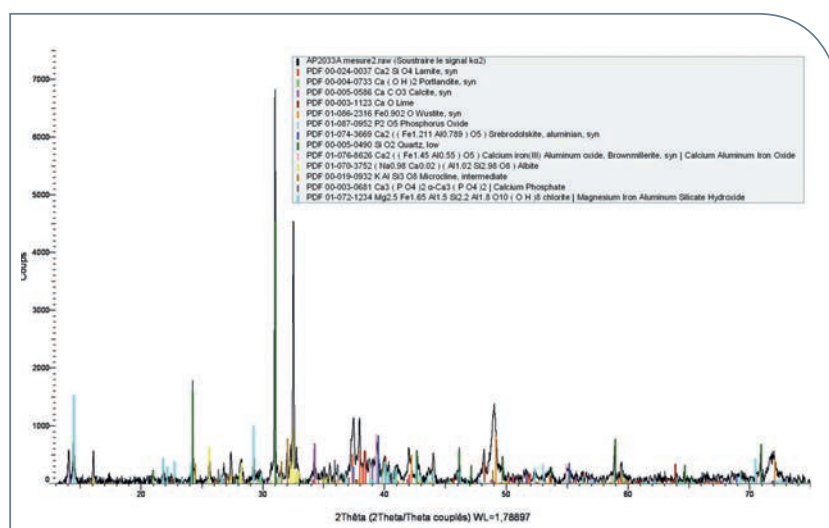
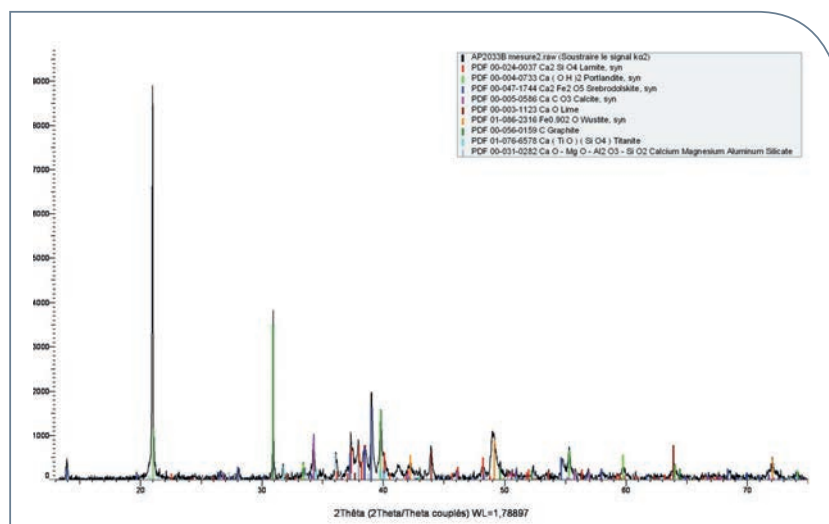


Figure 8
Diffractionnogramme
interprété
du laitier L12



L'interprétation des diffractogrammes (figures 4 et 5) a permis de mettre en évidence que les échantillons de L11 et L12 sont composés de phases majeures traditionnelles telles que la larnite, la wustite, la srebrodolskite ainsi que de la chaux vive, de la portlandite (avec un pic important à 21° dû à une orientation préférentielle) et de la calcite. Il est à noter la présence probable de « graphite » plus marqué dans l'échantillon L11 que L12 laissant présager une « pollution » du laitier.

On voit que sur les diffractogrammes, la portlandite ressort avec une intensité importante, ce qui signifie que la chaux libre s'est en grande partie hydratée, bien que les laitiers soient supposés de production récente. Il manque pour conclure de manière certaine le même diffractogramme après l'essai d'expansion. Cet essai nous permettrait de savoir si une part de chaux vive résiduelle s'est hydratée. En outre, bien que le lien entre teneur en chaux libre et pourcentage d'expansion semble naturel, le type de particule de chaux (nodulaire, diffuse) joue également un grand rôle. (cf Revue Laitiers Sidérurgiques n° 99 « Laitiers d'aciérie de conversion : sélection à la source ! »).

Conclusions et perspectives

Il ressort des mesures et essais effectués que les conditions opératoires (pression, température) jouent un rôle important sur le gonflement. Il apparaît possible en sévérant ces paramètres de reproduire en laboratoire les désordres volumiques en un minimum de temps et en réduisant drastiquement la prise de risque.

A la lecture des résultats du seul Steam Test, l'échantillon L2 serait apte à tous les usages tandis que le L11 serait restreint aux seuls enduits superficiels et GNT / GTLH.

On le voit, le taux de chaux libre important sur les laitiers L11 et L12 peut être relié à un potentiel d'expansion plus important que le laitier L2, où, manifestement, le niveau plus faible du taux de chaux libre correspond à moins d'expansion.

Cette étude montre la nécessité de travailler dans deux directions :

- la mise au point d'un essai avec des conditions sévérées permettant de reproduire en laboratoire des désordres volumiques permettant de réduire au maximum la prise de risque,
- la recherche d'un essai « crible » permettant de déterminer avec plus de certitude, qui du magnésium ou du calcium dans sa forme libre peut être relié à un potentiel d'expansion. Ce point particulier implique de travailler davantage avec des laitiers riches en magnésium obtenus lors d'opérations industrielles spécifiques.

Le but final est de permettre de caractériser le plus rapidement possible et avec la précision nécessaire à des usages de plus en plus exigeants en terme de performance, quitte à devoir définir et normaliser un nouvel essai.

Granulats de LAFE

des perspectives en béton !



Le béton hydraulique est un matériau de construction très largement employé en France et dont les applications consomment le tiers des 330 millions de tonnes de granulats produites annuellement.

Pendant de nombreuses années, les producteurs de béton se sont approvisionnés en granulats dans les carrières et sablières alluvionnaires. La raréfaction de cette ressource, couplée aux progrès de la maîtrise des formules béton, a conduit à consommer davantage de matériaux issus de roches massives.

En parallèle, l'existence en France d'aciéries de four électrique a permis de mettre sur le marché des granulats de LAFE (Laitier d'Acierie de Four Electrique) aux propriétés compatibles avec un usage en génie civil.

Les premières expériences dans différents pays ont montré que l'emploi de granulats de LAFE dans les bétons était possible, mais que cette ressource alternative nécessitait des études approfondies afin de cerner les spécificités et les limites d'emploi.

Le béton hydraulique

Le béton hydraulique dans son usage courant est un mélange de granulats (sables et gravillons), de ciment, d'eau et d'adjuvant.

L'hydratation, phénomène chimique dans lequel le ciment fixe une partie de l'eau de gâchage et enclenche les processus de prise et de durcissement du béton, va conférer au béton sa résistance à court, moyen et long terme. Cette résistance dépendra en partie de la résistance intrinsèque des granulats (gravillons) et de la qualité et la quantité de la matrice liante (fines du sable, ciment et eau). En parallèle, les réactions chimiques potentielles qui vont avoir lieu lors de la prise et sur le long terme peuvent avoir une incidence sur sa durabilité.

Le soin apporté à la mise en œuvre du béton est un autre aspect très important pour la pérennité de l'ouvrage en béton. Cette mise en œuvre sera d'autant plus aisée que le béton présentera une ouvrabilité adaptée au projet, obtenue notamment par la maîtrise du rapport massique eau efficace / ciment.

Dans la mesure où le granulat est le premier constituant en masse du béton, son choix doit être justifié en prêtant une attention particulière à sa compatibilité physique, chimique et mécanique avec les autres constituants présents dans la formule de béton.

Les granulats de LAFE

Les aciéries de four électrique sont plus nombreuses sur le territoire que les usines de la filière fonte. Pour une aciérie de ce type en filière carbone ou inox, il y a deux types de laitiers disponibles :

- les laitiers de four (LAFE),
- les laitiers de métallurgie secondaire, ou de poche (SMS).

Pour des raisons de disponibilité, de régularité et de propriété, nous ne nous intéresserons ici qu'aux granulats issus des laitiers de four. Les laitiers de poche sont encore trop mal connus et trop variables, d'un site à l'autre, pour envisager une étude avec des enseignements qui puissent être généralisés.

Les sites choisis l'ont été sur la base du volontariat et de la pertinence technique et économique dans la mesure où le granulat pour béton représente une valeur ajoutée intéressante pour un industriel. Compte tenu des acquis et des antériorités sur l'emploi de ressources minérales alternatives dans les bétons, il est apparu plus adéquat de travailler dans un premier temps sur la partie gravillonnaire. Les sables issus des LAFE seront étudiés dans un deuxième temps. Leur coefficient d'absorption d'eau perçu comme important pourrait compliquer l'étude des bétons, en particulier l'adjuvantation.

Les normes granulats pour béton, qu'elles soient françaises (NF P 18-545) ou européennes (NF EN 12620), sont rédigées pour des matériaux naturels. Il existe cependant des points particuliers pour les laitiers :

- les laitiers de haut-fourneau (LHF) avec l'évaluation de la désintégration du fer (Fe) et du silicate bi-calcaïque (C2S),
- les laitiers d'aciérie avec la stabilité volumique liée au test d'expansion à la vapeur.

Les normes granulats françaises et européennes pour un usage en béton hydraulique sont rédigées pour les matériaux naturels. En ce qui concerne les laitiers, seule est prévue

une vérification de la stabilité volumique des laitiers de haut-fourneau cristallisés. Sur le point particulier des laitiers d'aciérie, il n'existe pas de test discriminant permettant leur choix dans les mêmes conditions que les granulats naturels.

Programme de l'étude

L'étude complète a comporté plusieurs phases :

- **Phase n°1** : évaluation de sept sites des granulats de LAFE avec les essais suivants : dosage des chlorures, sulfates, désintégration du fer et du silicate bi-calcique, matières solubles et détermination des pertes au feu,
- **Phase n°2** : deuxième campagne de qualification de sept sites : granularité, fragmentation, usure, masse volumique et coefficient d'absorption d'eau,
- **Phase n°3** : essais sur béton de sept sites,
- **Phase n°4** : analyses complémentaires de 5 sites.

Tous les sites n'ont pas pu maintenir leur présence sur les 4 phases du programme. Les résultats proposés sont à replacer dans un contexte technique plus général. Il sont à rattacher à la mise en place d'une production régulière et d'une sélectivité associée.

Principaux résultats des phases de qualification des granulats de LAFE

• Chlorures, soufre et sulfates, désintégration

Les laitiers respectent les seuils les plus bas imposés par les normes NF EN 12620 et NF P 18-545 pour les chlorures, les sulfates et le soufre. Un des laitiers semble présenter un problème de stabilité au regard de la désintégration du fer et du silicate bi-calcique, mais cela demande à être confirmé par des analyses ultérieures afin de cerner la représentativité de l'échantillon employé et l'applicabilité de cette procédure pour des LAFE.

• Masses volumiques, coefficient d'absorption d'eau, chaux libre, alcali-réaction

Les granulats de LAFE sont caractérisés par des masses volumiques importantes, comprises entre environ 3,3 et 3,7 t/m³, qui permettraient de formuler des bétons lourds. Cette masse volumique élevée peut constituer un avantage dans certains contextes comme par exemple l'industrie nucléaire pour la radioprotection, ou encore le domaine maritime avec les blocs d'enrochement artificiels de protection du littoral, mais également un inconvénient compte tenu des surcoûts qu'elle peut engendrer au niveau du transport (diminution éventuelle du volume transporté pour limiter la charge sur essieux) ou d'éventuelles contraintes de formulation liées au maintien de la rhéologie du béton frais et de sa cohésion.

Les coefficients d'absorption d'eau sont presque toujours inférieurs à 2,5 % pour les gravillons et les sables. On note cependant une disparité d'un laitier à l'autre qui, sans être alarmante, attire l'attention sur la variabilité de ce coefficient, notamment pour les sables. Une valeur trop élevée engendrera une gestion de l'eau efficace plus compliquée et une augmentation en conséquence des dosages en agent réducteur d'eau.

Les teneurs en chaux libre (CaO + Ca(OH)₂), ne dépassent pas 0,3 % (cf. tableau 1) pour la totalité des gravillons de l'étude. Parallèlement, les valeurs d'expansion mesurées restent faibles (inférieures à 0,06 %), quel que soit le rapport C/G.

Bien qu'il n'existe pas de corrélation directe, nous pouvons remarquer que les faibles valeurs de chaux libre mesurées n'engendrent pas de phénomène d'expansion dans le cadre d'une transformation chaux - portlandite.

Concernant la prévention du risque d'alcali-réaction (RAG), les éprouvettes préparées selon les prescriptions de la norme NF P 18-594 (article 5.1, essai accéléré à l'autoclave sur mortier) ont montré des allongements inférieurs au seuil de 0,15 % donné dans le fascicule de documentation FD P 18-542, permettant de qualifier un granulat comme non réactif (NR) vis-à-vis du risque d'alcali-réaction.

PARTICIPANTS	N°2	N°3	N°4	N°5	N°7
%	41539 3-2	41539 5-2	41539 2-2	41539 1-2	41539 4-2
Fe (FeO)	13,31	23,89	17,73	34,39	24,61
CaO	38,33	31,84	32,33	22,99	27,99
SiO ₂	14,97	12,63	14,63	10,54	13,05
Al ₂ O ₃	13,26	9,28	10,72	7,13	9,22
MgO	5,24	2,66	5,75	2,82	4,40
MnO	3,87	7,08	6,09	5,91	6,83
TiO ₂	0,76	0,67	0,90	0,65	0,73
P ₂ O ₅	0,23	0,48	0,60	0,55	0,51
K ₂ O	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
BOUCLE	95,37	97,11	95,55	97,67	97,09
Cr ₂ O ₃	1,60	1,75	1,73	2,86	2,71
CaO libre	0,27	0,00	0,07	0,20	0,04
C	0,19	0,16	0,24	0,13	0,20
S	0,47	0,10	0,11	0,14	0,19

Tableau 1

Résultats des analyses chimiques par fluo X sur les sables et gravillons de LAFE.

Pour 5 des 7 sites ayant participé à cette étude, des analyses chimiques par fluo X ont été réalisées sur les sables de LAFE et les gravillons de LAFE. Ces résultats, pour les oxydes dont la teneur est supérieure à 1% en masse, sont donnés dans le tableau 1 ci-contre.

On rappellera que le dosage de la magnésie libre n'est pas aisé et qu'il n'existe pas de protocole reconnu actuellement, et encore moins encadré par une norme ou une recommandation.

Pour les sables issus de ces cinq sites, et en plus de la teneur en chaux (CaO) et magnésie (MgO) totale, des dosages de la teneur en chaux libre et magnésie libre ont été réalisés. Les résultats sont présentés dans le tableau 2.

Tableau 2

Synthèse des dosages en chaux et en magnésie libres et totales des sables et gravillons de LAFE

* protocole expérimental à valider

SABLE	
CaO total (%)	21,57 à 38,54
CaO libre (%)	0,20 à 1,37
MgO total (%)	2,97 à 5,91
MgO libre* (%)	0,03 à 0,90
GRAVILLON	
CaO total (%)	22,99 à 38,33
CaO libre (%)	0,19 à 0,53
MgO total (%)	2,66 à 5,75
MgO libre* (%)	0,01 à 0,35

Principaux résultats de l'étude béton

Propriétés à l'état frais

La densité des granulats de LAFE, comprise entre 3,3 et 3,7, accroît le risque de manque de stabilité du béton (ségrégation, perte de cohésion, ressuage). Ci-dessous, illustré par la figure 1, un béton de granulats naturels présentant une bonne compacité à l'état frais. Sur la figure 2, un béton de granulats de LAFE avec un volume de pâte insuffisant pour enrober correctement les gravillons de LAFE.



Figure 1
Illustration d'un béton de granulats
naturels à l'état frais



Figure 2
Illustration d'un béton de granulats de
LAFE à l'état frais

Sur l'ensemble des granulats de LAFE fournis par les sept sites, la substitution du sable naturel par du sable de LAFE s'est avérée difficile car les sables de LAFE étaient pauvres en fines et favorisaient un appauvrissement du volume de pâte liante. La valorisation des sables LAFE est envisageable dans la formulation des bétons sous deux conditions : un coefficient d'absorption d'eau maîtrisé et un squelette granulaire retravaillé.

La substitution du gravillon naturel par du gravillon de LAFE a moins d'impact sur la formulation. A volume de gravillon égal, un béton de granulats naturels a une masse volumique de l'ordre de 2300 kg/m³ alors qu'un béton constitué de sable naturel et de gravillon de LAFE a une masse volumique de l'ordre de 2600 kg/m³. Si en plus de substituer le gravillon naturel, une partie du sable est substitué par du sable de LAFE (50% par exemple), la masse volumique du béton peut atteindre environ 2900 kg/m³ et jusqu'à presque 3200 kg/m³ si tout le squelette granulaire est constitué de granulats de LAFE. Pour ces fortes masses volumiques, il devient alors nécessaire d'avoir un volume de matrice liante suffisant pour bien stabiliser les gravillons dans la masse de béton (répartition homogène et bon enrobage).

En cas de coefficient d'absorption d'eau élevé, un ajustement de l'adjuvantation peut s'avérer nécessaire pour obtenir l'ouvrabilité attendue du fait d'une absorption d'eau des granulats de LAFE qui peut parfois être plus élevée que celle des granulats naturels.

Propriétés à l'état durci

Les granulats de LAFE sont riches en oxydes métalliques, à l'origine d'une masse volumique élevée (entre 25 % et 45 % plus élevée que celle des granulats naturels). Cette composition minéralogique entraîne une résistance à la fragmentation et à la friabilité souvent plus élevée que celle des granulats naturels. A titre d'exemple, des valeurs de Los Angeles de 13 - 14 sont régulièrement obtenues sur certains sites. Ainsi les granulats de LAFE peuvent apporter une contribution plus élevée que les granulats naturels à la résistance mécanique du béton.

Sur les 7 bétons confectionnés à base de granulats de LAFE, on enregistre, pour 5 d'entre eux, des résistances mécaniques plus élevées de 10 à 50 % à l'échéance de 7 jours par rapport au béton témoin formulé avec 100 % de granulats naturels.

Cet aspect est un atout majeur pour les granulats de LAFE car il peut contribuer à des économies de liant ou des réduction de section.

La durabilité des bétons

L'altération des bétons peut avoir plusieurs origines.

Parmi celles-ci on peut citer les agressions chimiques externes (chlorures, sulfates, H_2S , ...), les agressions environnementales

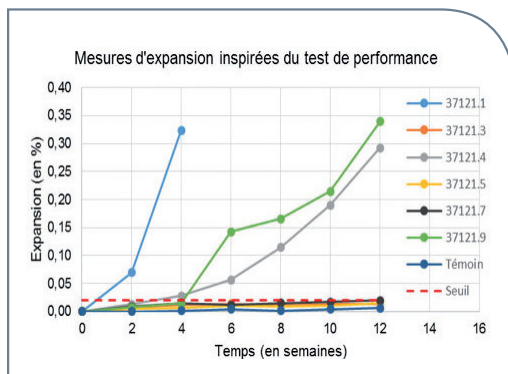


Figure 3

Illustration des gonflements importants pour les productions de 3 des 6 sites étudiés

(carbonatation, gel, dessiccation, ...) et les réactions de gonflement endogènes (alcali-réaction, réaction sulfatique interne,...). Il convient de s'assurer qu'aucune pathologie endogène n'est liée à l'introduction des granulats de LAFE.

Pour ce faire, différentes formules de béton (non optimisées) ont été soumises à un essai de performance reprenant les conditions de vieillissement de la norme NF P 18-454, mais sans ajout d'alcalins. Une campagne de mesure d'expansion des éprouvettes a été réalisée sur 12 semaines. Les gonflements mesurés sont illustrés par les figures 3 et 4. Les résultats sont disparates, certains

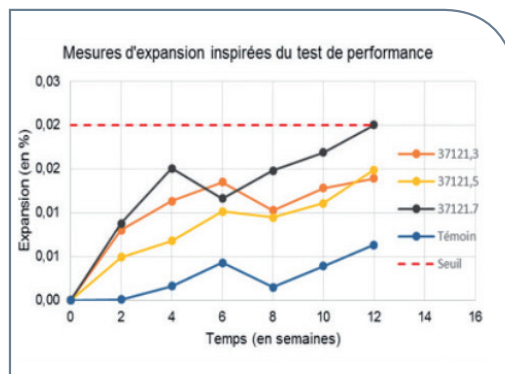


Figure 4

Illustration des gonflements plus latents et moins importants pour les productions de 3 des 6 sites étudiés

bétons présentent des variations dimensionnelles comparable à celles d'un béton témoin, d'autres formules conduisent à des gonflements sur le court et moyen terme, gonflements pouvant aller jusqu'à une fissuration pouvant aller jusqu'à une fissuration importante et préjudiciable.

La figure 5 illustre les fissures observées à l'issue de l'essai pour une éprouvette présentant un gonflement de l'ordre de 3 millimètres par mètre linéaire de béton.



Figure 5

Illustration de la macro fissuration d'une éprouvette de béton

Pour rechercher l'origine et l'explication de ces gonflements, des examens au Microscopie Electronique à Balayage (MEB) couplé au spectromètre X à dispersion d'énergie ont été réalisés.

Ces examens ont permis d'écarter les causes de type alcali-réaction (RAG) et une réaction sulfatique interne (RSI). En revanche, ils ont mis en évidence, dans certains granulats LAFE, des grains de composés magnésiens sous forme isolée ou sous forme d'inclusion. L'oxyde de magnésium MgO (périclase) lorsqu'il s'hydrate pour se

transformer en $Mg(OH)_2$ (brucite) voit son volume augmenter, créant ainsi des contraintes internes au béton pouvant s'accompagner de l'apparition de fissures.

La chaux libre CaO, lorsqu'elle s'hydrate pour se transformer en $Ca(OH)_2$ (portlandite), s'accompagne également d'une prise de volume. Cette seconde réaction, à l'inverse de la première, n'a été observée que dans un seul cas et dans une moindre mesure.

Les figures 6 et 7 illustrent les cristaux de périclase et brucite à l'origine des phénomènes de gonflement et fissuration observés sur certaines des bétons de granulats de LAFE.

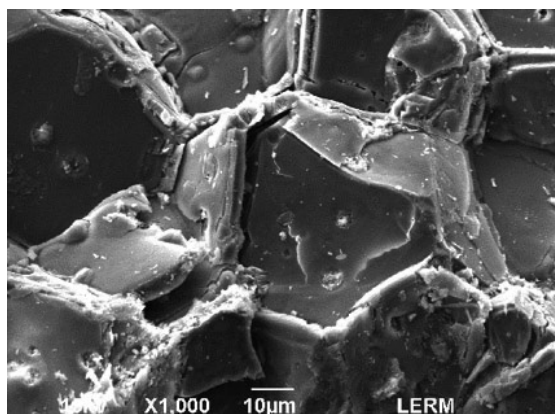


Figure 6

Microscopie électronique à balayage.
Aspect général d'un amas d'oxydes et/ou
d'hydroxydes de magnésium dans le béton

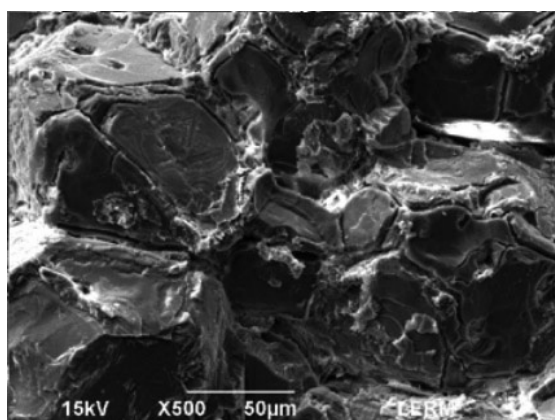
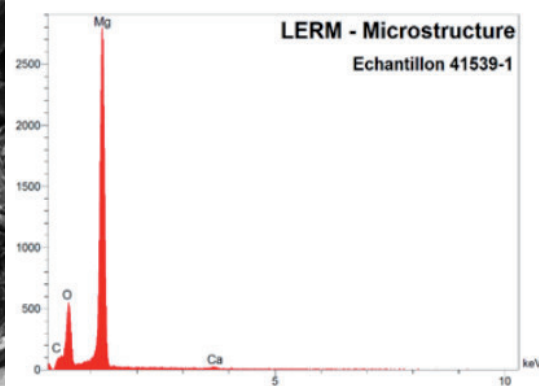


Figure 7

Microscopie électronique à balayage.
Détail d'un amas d'oxydes et/ou d'hydroxydes de magnésium



Conclusions

A ce stade des études, il apparaît que l'emploi de granulats de LAFE dans les bétons hydrauliques peut être envisagé moyennant certaines précautions.

De par leurs propriétés mécaniques, les granulats de LAFE peuvent conférer aux bétons des résistances mécaniques significativement plus élevées à dosage en ciment équivalent, ce qui présente un avantage notable. L'utilisation de ces granulats permet également d'augmenter la densité du béton, propriété recherchée pour certains usages spécifiques (radio-protection, enrochements, ...). A l'opposé, pour des applications plus traditionnelles, la masse volumique élevée de ces granulats peut devenir une contrainte technique et économique (ajustement des formulations pour développer un volume de pâte suffisant, surcoût dû au transport).

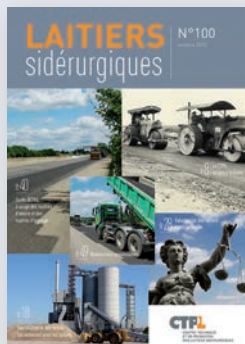
Les granulats de LAFE présentent une certaine variabilité (coefficient d'absorption, composition chimique et minéralogique) qu'il convient de maîtriser pour leur utilisation comme granulat béton. A l'heure actuelle, cette maîtrise apparaît plus facilement gérable pour les gravillons que pour les sables. La variation des coefficients d'absorption d'eau et le manque de fines des sables de LAFE font penser qu'à ce stade, il est préférable de se limiter à l'utilisation des gravillons.

De plus, certaines pratiques industrielles peuvent conduire à développer la présence de magnésie MgO et éventuellement de chaux vive CaO dont la présence est à proscrire pour assurer la durabilité des bétons dans le temps. Ce sujet est d'importance, car dans une industrie fortement consommatrice de réfractaires (briques de poches et de four), l'utilisation de magnésie induisant une contamination potentielle du laitier est stratégique. La sélectivité des laitiers, le soin apporté à leur préparation

et à leur maturation sont des moyens pour assurer la qualité requise des granulats de LAFE pour leur utilisation en bétons hydrauliques.

Des études devront donc encore être menées pour cerner les variabilités des gisements, les campagnes de sélection nécessaires, ainsi que la mise en place d'essais « cribles » adaptés aux spécificités des LAFE afin d'optimiser la sélection des granulats de LAFE éligibles à une formule de béton hydraulique.

Dans les précédents **NUMÉROS...**



N° 100 (octobre 2012)

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

• **Des chiffres et des lettres (de noblesse) pour les laitiers**

Evolution de la gestion des laitiers au cours des dix dernières années
Jérémie Domas : CTPL

- **Valorisation des laitiers : cadre juridique**
Etat des lieux juridique et statut des laitiers sidérurgiques
Jacques Reynard : CTPL

• **Guide SETRA, à usage des maîtres d'œuvre et des maîtres d'ouvrage**

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

• **Réalisations remarquables**

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

N° 102 (juin 2014)

- **Les produits laitiers, c'est bon pour la santé !**
Evaluation des risques pour la santé humaine liés à l'utilisation des laitiers sidérurgiques en construction routière
Dr Deborah Proctor
- **Des laitiers bons pour le service !**
Evaluation des risques sanitaires liés à l'utilisation de laitiers de convertisseur
Laurent Butez : SGA



N° 103 (octobre 2014)

- **Les LAC valorisés pour un retour à la source**

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

- **Que sont devenus les laitiers en 2013**

Production et devenir des laitiers sidérurgiques en 2013 en France.
Jérémie Domas : CTPL

- **Des laitiers à fort potentiel**

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

N° 104 (mai 2015)

- **Avec les LAC, ça pousse !**

Amendement des sols. Les laitiers sidérurgiques et leurs usages agricoles : un marché pérenne à fort potentiel.
Marc Fixaris : ArcelorMittal B.S.M.E

- **Les laitiers au secours de l'agriculture !**

Caractéristiques et apports des laitiers sidérurgiques en usages agricoles.
Mary Provance-Bowley : Harsco Metals and Minerals - Sarver, PA, USA

N° 105 (Octobre 2015)

Eaux en danger ! Les laitiers d'aciérie s'attaquent au phosphore

Captage du phosphore dissout dans les eaux de ruissellement et de drainage.
Chad PENN : Professeur Associé
Oklahoma State University -
Department of Plant and Soil Science

- **Que sont devenus les laitiers en 2014 ?**

Production et devenir des laitiers sidérurgiques en 2014 en France
Jérémie Domas : CTPL

- **Eaux usées :**

Les laitiers démontrent leur efficacité

Utilisation des laitiers pour le traitement des eaux usées
Florent Chazarenc : Ecole des Mines de Nantes
Marc Fixaris : Arcelormittal/BSME

N° 106 (Juin 2016)

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

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

George WANG et Yuhong WANGA : *Department of Construction Management, East Carolina University, Greenville, Etats-Unis*
Zhili GAOB : *Department of Construction Management and Engineering, North Dakota State University, Fargo, États-Unis*

• Des laitiers qui ont du caractère !

Caractérisation de l'expansion des laitiers d'aciérie à l'autoclave
John J. Yzenas Jr. : *Edward Levy Company, Dearborn, Michigan - Etats-Unis*

N° 107 (Juin 2017)

• Laitiers LD : Ils tiennent la route !

Performance des produits routiers bitumineux utilisant des laitiers d'aciérie LD (LAC)

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

• En sécurité avec les laitiers d'aciérie de four électrique

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

N. Jones : *Harsco Metals and Minerals, England*



N° 108 (Décembre 2017)

• Vu et pratiqué : retours d'expériences

- Le laitier de haut-fourneau moulu, une solution d'avenir
- Granulac®... un granulats artificiel d'exception
- Sous le béton, les laitiers
- Sidmix® : liant hydraulique écologique et polyvalent pour matériaux routiers

• Que sont devenus les laitiers en 2016

Production et devenir des laitiers sidérurgiques en 2016 en France
Jérémie Domas : *CTPL*

N° 109 (Juin 2018)

• Les laitiers sur 3 frontières

9^{ème} conférence Euroslag

• Radioactivité : les LHF aptes pour la construction

La radioactivité naturelle des laitiers de haut-fourneau peut-elle être un frein à leur mise sur le marché comme matériau de construction ?

P. Gauje : *ArcelorMittal France, Global Research and Development, Maizières Process*

F. Hanrot : *ArcelorMittal Luxembourg, European Procurement Organisation - By-Products Sales*
M. B. Mokili, M. Bailly, I. Deniau : *Laboratoire Subatech*



• LAFE : à chacun sa personnalité !

Analyse comparative et propriétés de deux laitiers d'aciérie de four électrique en vue de leur utilisation dans des bétons hydrauliques
Amaia Santamaria, José Tomás San José, Javier Jesús González : *UPV/EHU*
Flora Faleschini, Carlo Pellegrino : *DICEA-UNIPD*

N° 110 (Décembre 2018)

• Laitiers moulus : de la fonte au béton

A propos de la normalisation des bétons intégrant du laitier de haut-fourneau moulu
Nicolas Musikas : *ECOCEM*

Pascal Leconte *CTPL*

• Ouverture d'une nouvelle usine ECOCEM à Dunkerque

• Révéler et développer la valeur ajoutée des laitiers moulus

Projet Actislag : améliorer les performances des laitiers de haut-fourneau moulus dans les formulations du béton

G. Franceschini : *ArcelorMittal - European Procurement Organization - By-Products Sales*

• Que sont devenus les laitiers en 2017

Production et devenir des laitiers sidérurgiques en 2017 en France
Pascal Leconte : *CTPL*

LAITIERS
sidérurgiques

www.ctpl.info