

LAITIERS

sidérurgiques

N°110

Décembre 2018

page 10

LAITIERS MOULUS : De la fonte au béton

page 6

Actualaitiers

page 20

Ouverture

d'une nouvelle
usine Ecocem à
Dunkerque

page 24

Actislag

Révéler et développer
la valeur ajoutée
des laitiers moulus



page 32

Que sont devenus

les laitiers en 2017 ?

CTPL

CENTRE TECHNIQUE
ET DE PROMOTION
DES LAITIERS SIDERURGQUES

ecart



Nostalgie, quand tu nous tiens...

Lorsque je lis l'article relatif à l'étude ACTISLAG, je ne suis que modérément surpris de constater qu'après plus d'un siècle d'usage de laitier de haut-fourneau vitrifié dans le domaine des liants hydrauliques, on puisse encore chercher (et trouver !) des pistes d'amélioration de la qualité et/ou des performances des laitiers de haut-fourneau dans cet usage. Il est vrai que, si dès le départ de cette aventure, l'industrie cimentière a su en faire bon usage, elle s'est bien gardée d'en dévoiler toutes les qualités. Quant aux sidérurgistes, concernés par la production d'acier, ils ne témoignaient pas d'un intérêt farouche pour ce qui n'était alors qu'un déchet. Heureusement que la prise de conscience de l'importance de l'environnement a fait évoluer les mentalités et a (re)mis au premier plan de nos préoccupations le souci de réduire les déchets et de développer le ré-emploi et le recyclage dans notre vie quotidienne. Peut-être, comme nos voisins allemands, reviendrons-nous aux litres étoilés et aux consignes de mon enfance ? Après tout, la (re)construction de cimenteries sur les sites sidérurgiques de Fos et de Dunkerque nous replonge dans le passé puisque la première cimenterie produisant des ciments sidérurgiques s'était ouverte à Rombas en 1899 ?

L'emploi massif de laitier en substitution à des matières minérales naturelles dans la fabrication de liant pour le bâtiment et certains ouvrages est, certes, une très bonne chose mais je regrette l'abandon de l'emploi des laitiers en terrassement (les fameuses graves-laitier) de ma jeunesse. Même si la technique était rudimentaire, je me souviens que nos routes et nos parkings ne présentaient que très peu de fissuration et, par voie de conséquence,

de dommages dus à la pénétration des eaux dans les couches profondes des chaussées et/ou plateformes. Moins chère à réaliser, moins couteuse en entretien... peut-être serait-il temps de reconsidérer nos usages actuels (graves ciment ou bitume) et de remettre au goût du jour cette ancienne technique ?

De même, en regardant les statistiques et l'emploi des laitiers en laine de roche, marché qui ne peut qu'être porteur, je suis chagriné par le gâchis énergétique que constitue l'emploi de laitiers froids qu'il faut fusionner avant de les filer. Si l'énergie de la chaleur des laitiers de haut-fourneau en fusion se retrouve dans l'énergie latente de prise hydraulique, et que les fumées des hauts-fourneaux servent au séchage des laitiers vitrifiés et à la production d'électricité, on pourrait rêver à l'alimentation directe par poches-tonneaux de laitier de haut-fourneau et/ou d'aciérie en fusion dans des unités de filage de laine de roche...

Avec le temps, le changement culturel induit par la prise de conscience environnementale conjugué à la raréfaction de certaines ressources et à l'indispensable économie énergétique à réaliser dans notre vie quotidienne et dans tous les process industriels permettront d'ouvrir de nouveaux champs de réflexion et, partant, de nouveaux usages pour les laitiers sidérurgiques bénéfiques à notre société.

Je profite de la rédaction tardive de cet éditorial pour vous présenter, avec un peu d'avance, mes meilleurs vœux pour l'année 2019. Puisse cette année réconcilier notre quotidien et notre environnement !

Jacques Reynard
Président du CTPL

page 6 **Actualaitiers**

page 10 **Laitiers moulus : de la fonte au béton**



En France, l'emploi de laitiers de haut-fourneau moulus dans les ciments a fait son apparition dès le tout début du 20^{ème} siècle. Cependant dans le cadre de la fabrication des bétons, le remplacement d'une partie du ciment par du laitier moulu peut encore être fortement limité par certaines normes. Malgré de nombreuses études prouvant l'équivalence de mélanges de CEM I et de laitiers moulus comparés aux ciments de la norme EN 197, ce paradoxe normatif est resté en vigueur.

Dans ce contexte, l'objet de cet article vise à démontrer les propriétés et qualités des laitiers en addition aux bétons notamment en matière de solidité, de résistance

aux agressions diverses et d'esthétique.

Il semble cependant qu'aujourd'hui leur utilisation soit limitée aux applications où le ciment ne joue pas un rôle essentiel. De nombreuses propriétés des laitiers restent encore à découvrir pour mieux utiliser ce liant.

Nicolas Musikas - ECOCEM

Pascal Leconte - CTPL

page 20 **Ouverture d'une nouvelle usine
ECOCEM à Dunkerque**



Une nouvelle usine ECOCEM France a été inaugurée le 14 juin 2018 sur le port de Dunkerque, à proximité immédiate du site ARCELORMITTAL.

Actislag : révéler et développer la valeur ajoutée des laitiers moulus



En 2016, grâce aux efforts du CTPL et avec le soutien d'ArcelorMittal, le laitier granulé de haut-fourneau a finalement perdu son statut de déchet en France. Nous étions un des derniers pays en Europe à encore considérer comme déchet ce remarquable complément pour la production de béton et de ciment, reconnu par les normes et recommandé pour nombre d'applications à haute valeur ajoutée. Dès 2006, Arcelor, puis ArcelorMittal, a clairement considéré que le laitier granulé devait être traité comme un produit, pour non seulement ses utilisateurs, mais également le producteur. Ce dernier a donc l'obligation d'appliquer pour le laitier granulé toutes les règles de gestions correspondantes : stratégie commerciale, assurance qualité et développement technique. C'est pour cela qu'ArcelorMittal s'est engagé, en association avec Ecocem Ltd, et avec le soutien de laboratoires français et allemands reconnus, dans le projet Actislag. Celui-ci a pour finalité de fournir enfin les réponses aux questions concernant les véritables raisons des performances du laitier granulé dans les bétons, et des moyens de les améliorer.

G. Franceschini - European Procurement Organization - By-Products Sales

LAITIERS SIDÉRURGIQUES

72^{ème} année

Revue éditée et diffusée gratuitement par le CTPL

Directeur de la publication

Jérémy 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 : Ecocem,
Go Met', 123RF/R.Milert

N° ISSN 1166 - 3138

Dépôt légal :

4^{ème} trimestre 2018

Que sont devenus les laitiers en 2017 ?

Comme chaque année et pour la treizième année consécutive, le Centre Technique et de Promotion des Laitiers sidérurgiques (CTPL) a lancé en 2018 l'enquête nationale relative aux flux de laitiers sidérurgiques produits sur le territoire national en 2017. Cette enquête vise également à recueillir les données relatives à leurs principales filières d'utilisation par différents secteurs industriels.

Pascal Leconte - CTPL



Fonctionnement du CTPL

Réunion du CA du CTPL

La dernière réunion du Conseil d'Administration (CA) du CTPL s'est tenue le mercredi 5 décembre 2018 au siège du CTPL à Saint-Denis. L'occasion de faire un point d'avancement avec nos Administrateurs 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.

Les travaux techniques et scientifiques engagés en 2018 sont particulièrement des axes à poursuivre, ainsi que l'accompagnement et l'encadrement d'un stagiaire universitaire permettant de développer de nouvelles pistes de réflexion pour les années à venir.

Les prochaines réunions du Conseil d'Administration et de l'Assemblée Générale se tiendront au mois d'avril 2019.

Modification de la composition du CA du CTPL

Lors de la dernière réunion du Conseil d'Administration (CA) du CTPL, qui s'est tenue le mercredi 5 décembre 2018, M. Michel PUILLET, représentant des sites Arcelor-mittal Atlantique et Lorraine, a annoncé qu'il renonçait à renouveler son mandat pour 2019. M. Didier DUBOIS a été proposé pour le remplacer pour représenter cette entité. L'occasion pour nous de remercier M. Michel PUILLET pour son engagement depuis plusieurs années au sein du CTPL, et de lui souhaiter une bonne continuation dans ses futures missions.

International

Conseil d'Administration d'EUROSLAG

Au cours du second semestre 2018, plusieurs réunions du Conseil d'Administration d'EUROSLAG se sont tenues : le mercredi 29 août, le mardi 30 octobre, et le mardi 27 novembre 2018 à Düsseldorf. L'objectif a été de réunir les Administrateurs afin d'échanger sur les principes de base d'une réorganisation technique, administrative et financière des actions d'EUROSLAG et de faire une proposition avancée à la prochaine Assemblée Générale 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 mercredi 28 novembre 2018 au FEHS à Duisbourg. 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, mais aussi d'échanger sur les actions techniques en cours au sein des Etats Membres de l'UE.

A cette occasion, EUROFER a été invité (M. Aurelio Braconi) afin de présenter le contexte technico-réglementaire européen auquel la profession des laitiers doit et devra faire face au cours des prochaines années.

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.

Un rendez-vous à noter dès à présent sur 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. www.euroslag.com

Congrès annuel de la N.S.A.

La National Slag Association, l'association des opérateurs de laitiers aux Etats-Unis, a fêté son 100^{ème} anniversaire entre le 3 et le 7 septembre 2018 à Oxon Hill, près de Washington. Le CTPL a participé à ce Congrès, afin d'échanger avec ses homologues américains et de diffuser les bonnes pratiques mises en œuvre en France au cours de ces 10 dernières années à l'initiative du CTPL. Au travers des interventions qui se sont tenues lors des journées techniques de ce Congrès, nous avons pu constater

que certaines problématiques restaient similaires dans tous les pays, en particulier en ce qui concerne le statut juridique des laitiers, la maîtrise des risques environnementaux, ou encore certains aspects techniques comme l'expansion volumique.

L'occasion pour nous de se retourner sur le travail accompli outre-manche depuis plus de 100 ans au service des laitiers et d'évaluer l'approche suivie aux Etats-Unis.

Réunion du WoISS

Une réunion du réseau international World of Iron & Steel Slag « network » (WoISS) s'est tenue le vendredi 7 septembre 2018 en marge du Congrès de la NSA près de Washington. Animée par C. Heidrich (ASA), cette réunion a permis de réunir des représentants canadiens, américains, australiens, brésiliens et européens (FEHS et CTPL) afin d'échanger sur les grandes problématiques rencontrées pour les laitiers sidérurgiques, et de discuter des éventuelles actions qui pourraient être mises en œuvre de façon mutualisée pour l'ensemble des représentants.

Réglementation nationale et européenne

Statut juridique des laitiers sidérurgiques

Depuis la publication de notre dernier numéro (N°109, juin 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.

Le projet d'arrêté ministériel de SSD relatif au statut juridique des laitiers (d'aciérie de conversion) utilisés en tant qu'amendements minéraux basiques ne sortira sans doute jamais, la SSD se faisant via l'élargissement des prescriptions réglementaires du code rural et la publication et l'implémentation de l'article 95 de la loi EGalim.

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 très peu avancé en 2018, compte tenu des priorités nationales sur la FREC. Un premier projet d'arrêté ministériel définissant les conditions et les critères de SSD des laitiers utilisés pour ces usages a été rédigé. Après une procédure longue et complexe, les services instructeurs du MTES et l'ensemble de la profession semblent prêts et motivés pour que le statut juridique des laitiers sidérurgiques puisse enfin évoluer et décliner les principes mêmes de la politique nationale sur l'Economie Circulaire.

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 « alternatives ». A cette fin, les laitiers sidérurgiques sont intégrés dans le processus. Si certaines régions ont déjà commencé en sollicitant les différents acteurs (Rhône Alpes Auvergne, PACA) d'autres doivent très

prochainement lancer la démarche (Hauts de France, Grand Est). Le CTPL participe à ces réunions dans les régions concernées ; pour la région Hauts de France, une réunion préparatoire était programmée le 7 décembre 2018.

Guide méthodologique sur la construction

Dans le même esprit que le guide d'acceptabilité environnementale en technique routière, l'Administration souhaite rédiger un guide (méthodologique) destiné à l'emploi de matériaux alternatifs dans la construction en bâtiment. La démarche n'en est encore qu'aux prémices et quatre réunions des parties prenantes ont eu lieu en décembre 2017, puis en mars, en mai et en novembre 2018. La prochaine réunion se tiendra début 2019.

On y voit aujourd'hui un peu plus clair sur la démarche méthodologique proposée pour encadrer l'acceptabilité environnementale et sanitaire des matériaux alternatifs utilisés dans des usages de construction. Un premier projet de guide a été proposé en novembre aux parties prenantes. Cependant, bon nombre de questions et d'éclaircissements restent encore en suspens.

En effet, ce guide fait reposer la contrainte de contrôle sur les matériaux alternatifs rentrant dans la composition, alors qu'en fin de compte ce sont les produits de construction qui seront mis en œuvre. Cela soulève la question du champ d'application de ce guide, et l'articulation avec les futures exigences relatives aux substances dangereuses réglementées potentiellement émise par les produits de construction, ainsi que sur les scénarios et les voies d'exposition pertinentes à retenir dans le cadre de cette approche.

Dossier d'enregistrement des laitiers sidérurgiques dans REACH

Le REACH Ferrous Slag Consortium (RFSC) continue de travailler à la révision du Chemical Safety Report (CSR), afin de mieux prendre en considération les caractéristiques des gisements produits en Europe, mais également d'intégrer les évolutions

des recommandations de l'Agence européenne (ECHA).

L'Assemblée Générale du RFSC s'est tenue le 11 octobre dernier à Düsseldorf. L'occasion pour le Working Committee de présenter aux Membres les dernières avancées et évolution sur le dossier laitiers et sur l'enregistrement REACH. La prochaine réunion de l'AG ne se tiendra maintenant qu'en 2020 compte tenu des travaux restant à réaliser.

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

La révision sur le Règlement européen relatif aux fertilisants progresse lentement mais sûrement au sein des instances européennes. La Commission, le Parlement et le Conseil ont ainsi démarré depuis le début de l'année les discussions en « trilogue », afin de trouver un compromis pour la publication de ce nouveau Règlement, qui ne sera sans doute pas applicable avant le début de l'année 2020.

A noter que le Conseil est présidé à tour de rôle par chaque Etat pour une durée de six mois (janvier-juin ou juillet-décembre) selon un ordre préétabli. Actuellement, c'est l'Autriche (juillet-décembre 2018) qui l'occupe encore pour quelques semaines. La Roumanie (janvier-juin 2019), la Finlande (juillet-décembre 2019), la Croatie (janvier-juin 2020), puis l'Allemagne (juillet-décembre 2020) suivront.

Des modifications importantes sont attendues par rapport à la version de 2003, en particulier sur les spécifications pour les catégories de produits (PFC), l'incorporation de valeurs limites en éléments traces, la prise en compte de la sortie du statut de déchets, ou l'utilisation comme matières premières (CMC) des co-produits industriels. Cependant, rien n'est encore figé et les discussions en cours se poursuivent. La dernière réunion du trilogue s'est tenue le 20 novembre dernier.

Normalisation

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

Les travaux de révision du DTU 13.3 rentrent dans la phase qui concerne plus particulièrement le choix des matériaux pour l'exécution du fond de forme ainsi que du béton de dallage. Compte tenu du fonctionnement particulier des DTU, qui sont à la fois des normes et des documents entraînant des garanties décennales avec la volonté de privilégier les techniques courantes, chaque proposition doit être minutieusement préparée. Ainsi donc, l'ouverture de la couche de forme aux laitiers stables d'un point de vue volumétrique et des formules bétons avec un pourcentage de laitier moulu élevé doivent faire l'objet d'un dossier technique étayé.

CEN/TC 51 - Ciment et liants hydrauliques

Le mandat M114 révisé et accepté pour tenir compte de deux nouvelles classes de ciment va rentrer en application. Les nouvelles classes (un CEM II et un CEM VI) confirment la tendance nette de l'industrie cimentière en France et en Europe de décarbonater la production de ciment en baissant les taux de clinker. Cette démarche a cependant ses limites : la volonté de décideurs de la Commission Européenne d'adopter une démarche uniquement performantielle se heurte à la nécessité de déclarer une composition cible. Dans le cas des laitiers, cette approche apparaît favorable, tout en sachant que le nouveau règlement de la marque NF offre plus de souplesse pour l'obtention du marquage.

CEN/TC104 - Bétons

La France par la voie de son organisation de normalisation l'AFNOR s'était portée candidate à la reprise du secrétariat du TC104 et du TC104/SC1 suite à leur abandon par l'Allemagne (DIN). A l'issue d'un vote serré avec une abstention élevée, c'est finalement la Norvège qui remporte les deux secrétariats. Ce n'est pas forcément un désaveu pour l'AFNOR, ni une mauvaise décision du point de vue technique et scientifique. En revanche, cela évite pour les participants aux

groupes miroirs français du TC104 de devoir supporter des coûts de fonctionnement supplémentaires comme cela avait été évoqué lors de la candidature de l'AFNOR.

CEN/TC154 - Granulats

L'actualité du TC154 est dominée par les révisions des normes produits pour bétons hydrauliques, pour enrobés bitumineux, pour mortiers, qui sont pour l'instant bloquées en raison de l'avis négatif du consultant HAS. En parallèle, la nouvelle norme sur l'attestation de conformité EN 16236 est en préparation, ainsi que les travaux de révision de la NF P 18-545 qui ont débuté.

La possible introduction des matières dangereuses dans les normes granulats amènera probablement à terme la révision du mandat M125. A retenir également le travail du TC154/WG12 sur les sources secondaires de granulats, qu'on peut comprendre comme matériaux alternatifs en lien avec le TC396/WG7 sur ces matériaux utilisés en terrassement.

CEN/TC227 - Assises de chaussées

La dernière réunion du groupe miroir français le 13 novembre 2018 a permis de faire un point sur la normalisation dans les matériaux de chaussées, où le regroupement des normes produits de la série EN 14227 en une seule est évoqué. En parallèle, le TC227 étudie la possibilité de créer un Task Group sur les substances dangereuses réglementées. Ce sujet n'a pas encore fait l'objet de travaux approfondis. Cela pourrait avoir des conséquences importantes si la vision de pays comme la Hollande militant pour un AVCP R+ l'emportait. A noter également les premiers résultats des essais croisés accélérés en traitement de sols dans l'optique de la réalisation de « petits chantiers ». Des résultats intéressants ont été obtenus mais il ne se dégage pas encore de corrélation claire temps - température.

CEN/TC 260 - Engrais et amendements minéraux basiques

Les travaux français du BN FERTI ont permis la révision et la publication en septembre 2017 de la norme française NF U44-001 relative aux Amendements Minéraux Basiques (AMB). Malheureusement

ce texte, contrairement à son pendant européen NF EN 14069 pré-publié en novembre 2017 (Amendements minéraux basiques - Dénominations, spécifications et étiquetage), n'inclut que les laitiers d'aciérie de conversion moulus, et pas les mêmes laitiers d'aciérie de conversion simplement criblés.

L'harmonisation des spécifications n'est pas non plus parfaite en ce qui concerne les valeurs limites en éléments traces, où par exemple le projet de règlement européen propose une valeur limite en chrome hexavalent de 2 mg/kg, alors que la norme française retient 4 mg/kg. L'annexe 1 de l'arrêté ministériel du 2 août 2018 (JORF du 24 août 2018) rend dorénavant d'application obligatoire la norme NF U44-001, publiée en septembre 2017.

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 à Berlin les 19 et 20 juin 2018 au DIN. Elle a permis d'examiner l'ensemble des résultats de l'étude interlaboratoire de validation des normes de lixiviation (et d'analyse), présentées par le JRC/IPTS de la Commission Européenne. Encore pas mal de questions ont pu émerger de la présentation des résultats sur l'analyse des paramètres minéraux, en particulier sur la représentativité des échantillons. Le lancement de l'étude de validation pour les paramètres organiques est également en cours et se déroulera jusqu'à la fin 2019. La prochaine réunion se tiendra les 30 et 31 janvier 2019, l'occasion de poursuivre l'analyse des données.

WG3 - Radioactivité des Produits de Construction

Un projet de norme a été proposé concernant l'évaluation de la dose de l'émission de rayonnement gamma. Les travaux devraient commencer au début de l'année 2019.

Un rapport technique devrait être prochainement rédigé quant aux méthodes alternatives utilisables pour quantifier les concentrations d'activité des radioéléments ²²⁶Ra, ²³²Th et ⁴⁰K par spectrométrie de rayons gamma (γ). Ces travaux démarreront également au début de l'année 2019.

CEN/TC396 - Terrassements

Le groupe miroir français, la Commission Nationale Terrassements, s'est réuni le 20 septembre 2018. L'actualité est dominée par l'acceptation au vote formel des normes terrassements de la série EN 16907 en avril 2018 qui va entraîner en France l'édition d'un fascicule de documentation dédié. Bien que ces normes ne soient pas harmonisées, le ministère a passé commande au CEREMA pour lancer la révision du GTR qui constitue jusqu'à présent le document de référence incontournable dans le domaine des terrassements.

Ces travaux de révisions, organisés en sous groupes, avec un groupe dédié aux matériaux alternatifs dont les laitiers, ont pour objectif de proposer une version pour fin 2019.

A noter l'interaction forte entre ce sous groupe et le TC396/WG7, réuni les 25 et 26 septembre 2018 dont l'objet est la rédaction d'un Technical Report (TR) consolidant les acquis européens en matériaux alternatifs utilisés en Terrassement.

Modification du fonctionnement du BN TRA

En marge de la nouvelle organisation du BNTRA et des incidences financières, Le Comité d'Orientation (CODOR) s'est réuni le 14 septembre 2018. Le Comité de Pilotage Stratégique (COPIST) a été élu (une seule liste présentée pour le collège des entreprises).

Environ 600 experts ont déclaré vouloir poursuivre leur investissement dans les travaux de normalisation, ce qui est proche des estimations faites dans les prévisions de budget du BNTRA, soit 50 % du collège total initial.

Le BNTRA va envoyer prochainement une liste des experts qui se sont fait connaître aux organismes représentés afin qu'ils valident la participation de ces experts aux différentes commissions d'ici fin septembre afin de rédiger les conventions de participation aux frais d'inscription avant la fin de l'année.

Communication

IDRRIM

Le congrès de l'IDRRIM s'est tenu les 10 et 11 octobre à Lille. L'actualité est marquée par la publication du Rapport 2018 de l'ONR (Observatoire National de la Route). L'IDRRIM via ses différents groupes de travail (Comité Méthodologique, Comité Avis, Groupe Spécialisé matériaux granulaires) exerce une mission de coordination et de surveillance sur les activités en France liées aux routes et aux transports. Il a été beaucoup question de routes connectées, de matériaux intelligents ces derniers temps. La mise à jour de la note d'information n°32 consacrée aux matériaux alternatifs avec la publication de deux autres guides va être le moyen de remettre nos sujets au centre du débat.

Le CTPL sur les réseaux...

A noter la création d'un compte LinkedIn pour le CTPL, avec toujours le site internet www.ctpl.info.

N'hésitez pas à nous rejoindre nombreux.

Formation

Pendant 6 mois le CTPL a abrité un stagiaire de l'Ecole des Mines de Douai qui a travaillé sur l'expansion volumique potentielle des laitiers sidérurgiques. La soutenance de ces travaux a eu lieu le 6 septembre dernier, et cela nous a permis de faire un point des connaissances en matière d'essais d'expansion et plus précisément du « Steam test » ou essai à la vapeur de la norme NF EN 1744-1.

Ce stage a été l'occasion de faire un état des lieux, avec en perspective la possibilité de reprendre ce sujet presque « dormant » notamment via le groupe d'experts dédiés d'Euroslag.

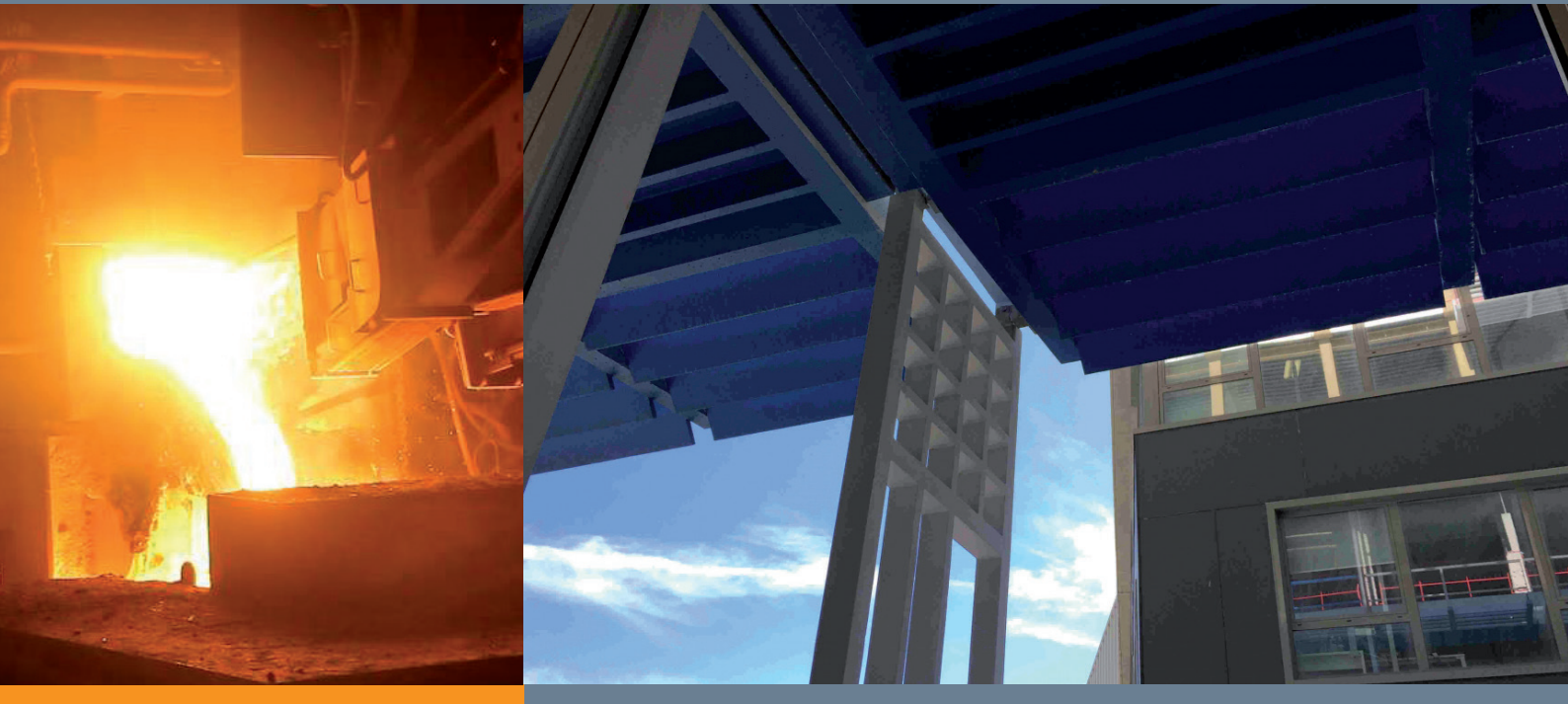
Le CTPL souhaite continuer en 2019 avec un autre sujet de stage, dédié plus spécifiquement à la valorisation de matériaux d'excavation stabilisés grâce aux laitiers sidérurgiques.

Tous les renseignements pour ce stage figurent sur notre site internet :

<http://www.ctpl.info/wp-content/uploads/2018/10/Stage-Etudiant-CTPL-2018-2019.pdf>

A noter également une étude contextuelle pour les enrochements, où comment tirer profit des propriétés des laitiers dans un contexte hydraulique et/ou de protection, à l'heure où les changements climatiques et les dérèglements se font de plus en plus présents.

Laitiers moulus : de la fonte au béton



En France, l'emploi de laitiers de haut-fourneau moulus dans les ciments a fait son apparition dès le tout début du 20^{ème} siècle. Cependant dans le cadre de la fabrication des bétons, le remplacement d'une partie du ciment par du laitier moulu peut encore être fortement limité par certaines normes. Malgré de nombreuses études prouvant l'équivalence de mélanges de CEM I et de laitiers moulus comparés aux ciments de la norme EN 197, ce paradoxe normatif est resté en vigueur. Dans ce contexte, l'objet de cet article vise à démontrer les propriétés et qualités des laitiers en addition aux bétons notamment en matière de solidité, de résistance aux agressions diverses et d'esthétique. Il semble cependant qu'aujourd'hui leur utilisation soit limitée aux applications où le ciment ne joue pas un rôle essentiel. De nombreuses propriétés des laitiers restent encore à découvrir pour mieux utiliser ce liant.

Un peu d'histoire

L'usage du fer que l'on n'appelait pas encore acier est très ancien. On retrouve des traces de son utilisation en Europe avant Jésus-Christ ainsi qu'en Chine. Le fer ainsi produit a été pendant longtemps un métal contenant de nombreuses inclusions minérales comme la silice ou l'alumine.

On retrouve des traces des premiers hauts-fourneaux, ancêtres des dispositifs modernes, en Belgique en 1340, en Allemagne au XIII^{ème} siècle et en France à la même période.

Jusqu'au XIX^{ème} siècle avec l'apparition des fours et des convertisseurs Martin, on ne savait produire que de la fonte, et on ne parlait pas encore d'acier au sens moderne du terme. Le laitier était alors considéré comme un produit « fatal » et sa séparation de la fonte n'était pas encore industrialisée.

A partir du XIX^{ème} siècle, avec l'apparition des dispositifs COWPER, les découvertes de Louis Vicat sur le ciment et les prémices des propriétés hydrauliques des laitiers par Lorient, on commença à produire de l'acier à partir de la fonte et à générer un laitier avec une composition chimique très proche de celle d'aujourd'hui. Depuis cette période, les procédés industriels se sont sans cesse améliorés et la gestion des laitiers, qui étaient au départ perçus comme des substances dont il fallait se débarrasser, a permis de les valoriser au mieux de leurs intérêts.

Le laitier de haut-fourneau

Le haut-fourneau moderne est une installation industrielle produisant de la fonte à partir de minerai de fer et de coke. Le schéma ci-dessous (Figure 1) montre une installation type en coupe.

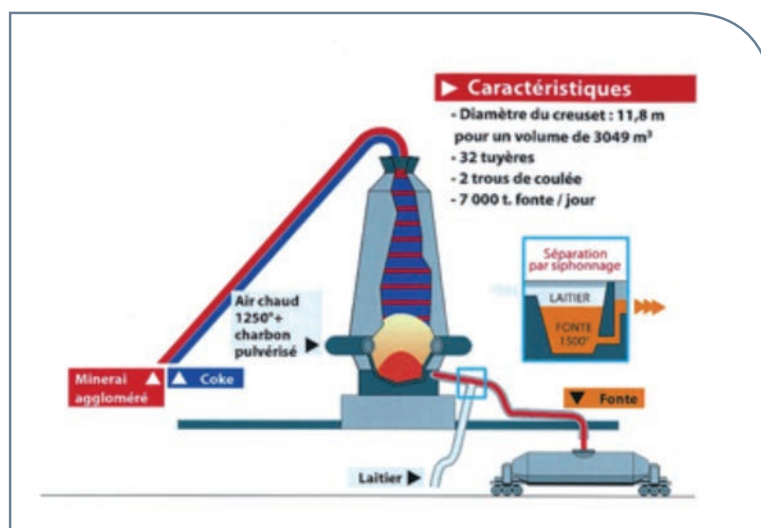


Figure 1
Exemple d'installation de haut-fourneau

A la base du haut-fourneau, la fonte et le laitier sont séparés par densité. La veine liquide de laitier peut alors être :

- dirigée vers un granulateur, où le laitier va être brutalement refroidi par un jet d'eau sous haute pression. Sous l'effet de cette trempe, le laitier va se fragmenter et se vitrifier pour obtenir un sable jaune clair de granulométrie 0/5 mm ;
- orientée vers une fosse, où le laitier sera refroidi lentement à l'air pour devenir du laitier cristallisé, qui sera par la suite dérocté pour obtenir un matériau granulaire 0/D.

La composition chimique typique du laitier de haut-fourneau est stable pour un haut-fourneau donné (exprimé en %) :

CaO	35 - 43 en Europe de l'Ouest
SiO ₂	31 - 39
Al ₂ O ₃	9 - 16
Fe ₂ O ₃	0.3 - 0.8
MgO	6 - 12
S	0.6 - 1.4
(CaO + MgO) / SiO ₂	1.2 - 1.6

Les ratios de production obtenus avec les minerais de fer actuels, qui sont importés, sont d'environ 300 kg de laitier par tonne de fonte. Alors qu'au début de la sidérurgie moderne le laitier était mis en stock sous forme de crassier dans des zones éloignées des hauts-fourneaux, il est désormais valorisé à travers toutes ses propriétés hydrauliques.

Le laitier de haut-fourneau vitrifié (ou granulé) noté LHFg possède des propriétés particulières :

- Il a une structure vitreuse, c'est-à-dire une structure où les atomes sont désordonnés, contrairement à un cristal. On parle aussi de solide amorphe.
- Il est réactif en milieu hydraté, d'autant plus avec un pH élevé. Il forme des silicates et aluminates de calcium hydratés. Il contient une énergie importante : la trempe a « piégé » son énergie de cristallisation. Comme cette énergie n'est pas dissipée, elle va se transformer en hydraulité.

A titre de comparaison, les compositions chimiques typiques des ciments Portland et des laitiers sont les suivantes (Figure 2).

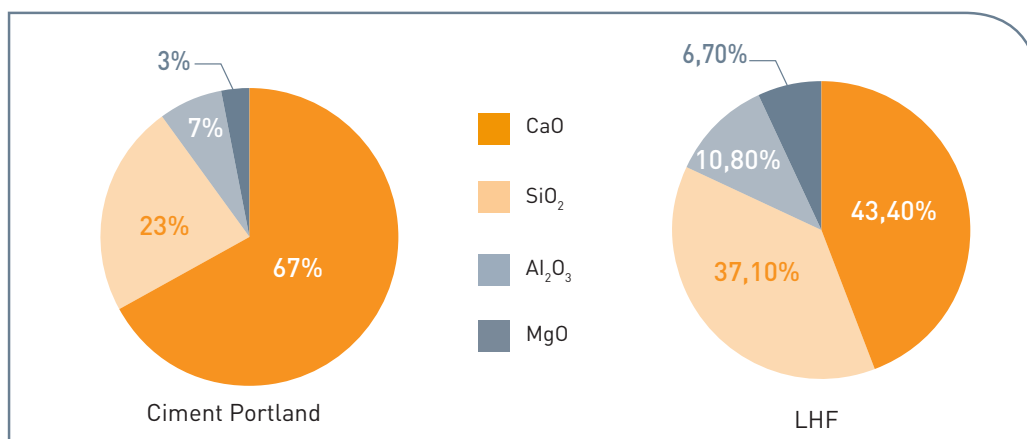


Figure 2

Comparaison des compositions chimiques des ciments Portland et des laitiers de haut-fourneau

Sur le diagramme de Keil ci-contre (Figure 3), on note la proximité entre les laitiers de haut-fourneau et les clinkers Portland.

Les laitiers, comme les ciments Portland sont des produits à forte hydraulité. La différence majeure est que le ciment est rapidement soluble dans l'eau, le pH de la solution est voisin 13.

Le laitier s'hydrate très lentement si le pH est de l'ordre de 10, pour des pH supérieurs l'hydratation est plus rapide. Cette analogie de composition et d'hydraulité avait été

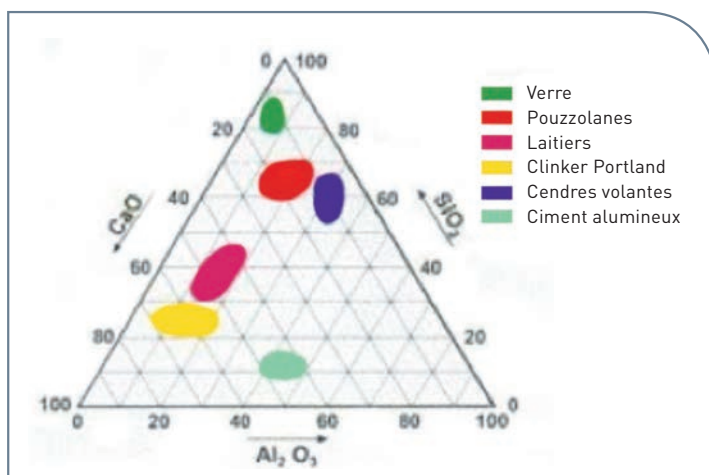


Figure 3

Diagramme de Keil mettant en valeur la proximité des laitiers de haut-fourneau avec les clinkers Portland.

esquissée par Louis Vicat (1786 - 1861) et il avait pressenti l'utilisation des laitiers dans la fabrication du ciment.

L'emploi de laitier vitrifié, puis moulu, dans les ciments a largement précédé la normalisation en particulier en France, où les ciments au laitier, appelés parfois «ciments métallurgiques» ont fait leur apparition dès 1900 dans la construction du métro parisien. Il a fallu attendre 1928 pour qu'ils apparaissent à leur tour dans la normalisation.

L'utilisation du laitier moulu dans les bétons encadrée par la normalisation repose sur le concept de performance équivalente du béton. Les principes du concept de performance équivalente de combinaison autorisent une gamme définie de combinaisons de ciments conformes à l'EN 197-1 et d'addition(s) dont l'aptitude à l'emploi a été établie, qui peuvent prendre intégralement en compte les exigences de rapport maximal eau/ciment et de dosage minimal en ciment qui sont spécifiées pour un béton.

L'utilisation du laitier moulu dans les bétons de structure

Introduction

Le laitier moulu de haut-fourneau dont l'usage est repris dans les textes européens répond à la norme NF EN 15167-1, 2006 : Laitier granulé de haut-fourneau moulu pour utilisation dans le béton, mortier et coulis - Partie 1 : définitions, exigences et critères de conformité.

Dans le cas d'ECOCEM, le laitier généré dans son usine de Fos-sur-Mer bénéficie du certificat de constance des performances depuis le 10 janvier 2014. La nouvelle usine de Dunkerque répond également à ce processus normatif.

Les principales normes et règlements en France

Les principaux textes qui définissent les caractéristiques, compositions et contrôles du béton en France sont les suivants :

- NF EN 206/CN (2016),
- L'Eurocode 2,
- Fascicule 65 du CCTG : document d'exécution pour le génie civil (2017),
- DTU 21 : document d'exécution pour le bâtiment (2017),
- IN 00 34 : document d'exécution pour les ouvrages SNCF (2014),
- Bétons hors champs d'application.

La norme NF EN 206/CN (2016) n'est pas une norme harmonisée. Elle intègre cependant un volet consacré au contrôle de production et sert aujourd'hui de pièce de référence dans les marchés de travaux.

La norme NF EN 206/CN

Le fonctionnement de la formulation des bétons décrits dans la norme repose sur le concept des classes d'environnement. Elles peuvent être regroupées dans 9 catégories : X0/ XC1-XC2// XC3-XC4-XF1-XD1// XF2/ XF3// XS1-XS2-XA1-XD2// XF4/ XS3-XD3-XA2// XA3

Où la lettre après le X précise le risque :

C : carbonatation, F : gel, D : chlorures autres que marins, S : environnement marin, A : attaque chimique

• Sa partie prescriptive Tableaux NAF-1 ou NAF-2 (bétons courants)

Pour chaque catégorie, la norme prévoit : une teneur en liant équivalent, une classe de résistance pour les bétons, une limite minimale du pourcentage d'air pour bétons soumis aux basses températures.

Pour les additions, dans le cas du laitier une limite du pourcentage de laitier combiné soit à un CEM I soit à un CEM II/A, peut être prise en compte pour le calcul de la teneur en ciment. La limite du pourcentage de laitier combiné à un CEM I est de 30%, et s'élève à 20% pour le laitier combiné à un CEM II/A.

• Sa partie prescriptive Tableau NAF-3 (bétons d'ingénierie)

La limite de la teneur maximale en laitier pour le calcul du liant équivalent est portée à 50% pour les combinaisons avec du CEM I (sauf les 3^{ème}, 4^{ème} et 5^{ème} catégories limitées à 40%, pour XF4 limite = 15%). Pour les combinaisons avec du CEM II/A, la limite est fixée à 35% sauf les 3^{ème}, 4^{ème} et 5^{ème} catégories, limite = 30%. Pas de possibilité de mettre du laitier avec XF4.

• Approche performantielle

Le principe est admis par la norme NF EN 206/CN ; les modes opératoires sont en cours de rédaction. Le délai est estimé supérieur à 2 ans à la date de rédaction du présent article.

Une méthodologie d'application du concept de performances équivalentes a été publiée sous l'égide de la Fédération Nationale des Travaux Publics en mars 2009 (recommandations professionnelles provisoires). L'IFSTTAR (ex LCPC) a publié en mars 2010 un guide « Maîtrise de la durabilité des ouvrages d'art en béton Application de l'approche performantielle ».

	X0	XC1- XC2	XC3 - XC4 XF1 - XD1	XF2	XF3	XS1 - XS2 XA1 - XD2	XF4	XS3 - XD3 XA2	XA3
Rapport E/C	-	0,65	0,60	0,55	0,55	0,55	0,45	0,50	0,45
Classe de résistance minimale	-	C20/25	C25/30	C25/30	C30/37	C30/37	C30/37	C35/45	C40/50
Teneur minimale en air (%)				4	4	4			
Teneur mini en liant équivalent en kg/m ³	150	260	280	300	315	330	340	350	360
Combinaison avec CEM I Rapport maxi A/(A+C)	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,15	0,30	0,30
Combinaison avec CEM II/A Rapport maxi A/(A+C)	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0	0,20	0,20

Tableau 1

Extrait tableau NAF-1 : Valeurs limites applicables en France pour la composition et les propriétés du béton en fonction de la classe d'exposition.

Les teneurs en laitier moulu et les coefficients k

Contrairement à de nombreux pays, le remplacement d'une partie du ciment par du laitier moulu peut être limité fortement par certaines normes en France. Ce remplacement peut être en plus affecté d'un coefficient «k» de 0.9. C'est-à-dire que si on veut remplacer 100 kg de ciment, il faudra prévoir 110 kg de laitier moulu.

Malgré de nombreuses études prouvant l'équivalence de mélanges de CEM I et de laitiers moulus comparés aux ciments de la norme EN 197, ce paradoxe normatif est resté en vigueur. Un ciment normalisé EN 197 peut contenir jusqu'à 95 % de laitier granulé alors que la teneur en laitier granulé au malaxeur à béton est limitée à 30 % (cas général) ou à 50 % (cas des bétons d'ingénierie ou plus, comme le cas des bétons hors champs d'application et des bétons répondant aux exigences de la SNCF).

Si le pourcentage de laitier moulu n'intervient pas dans le calcul de la teneur en

ciment, le bétonnier est libre d'augmenter le dosage. Le laitier est classé comme une addition minérale de type II au sens de la EN 206 dans la mesure où elle manifeste de la pouzzolanité.

Par ordre d'application en teneurs décroissantes :

- Bétons hors champ d'applications. Les bureaux d'études peuvent accepter une étude documentée ouvrant la possibilité à dépasser les limites des normes en vigueur. Dans ce cas là, l'ouvrage peut être assuré. $k = 1.0$ (exemple accord pour la construction d'un silo de 3000 m³, fondations avec liant contenant 70% de laitier et fût contenant 50% de laitier).
- IN 00 34 : Le référentiel SNCF est adapté aux exigences liées à l'environnement : pour une teneur en laitier supérieure à 60%, nécessité d'une étude, ou bien sans étude, limite fixée à 50%. Dans tous les cas $k = 1.0$.
- Fascicule 65, DTU 21, NF EN 206/CN, tableaux NAF- 3 et NAF-4, pourcentage de laitier limité à 50%, $k = 0.9$.
- NF EN 206/CN tableaux NAF-1 et NAF-2, pourcentage de laitier limité à 30 % avec $k = 0.9$.

	X0	XC1- XC2	XC3 - XC4 XF1 - XD1	XF2	XF3	XS1 - XS2 XA1 - XD2	XF4	XS3 - XD3 XA2	XA3
Rapport E/C	-	0,65	0,60	0,55	0,55	0,55	0,45	0,50	0,45
Classe de résistance minimale	-	C20/25	C25/30	C25/30	C30/37	C30/37	C30/37	C35/45	C40/50
Teneur minimale en air (%)				4	4	4			
Teneur mini en liant équivalent en kg/m ³	150	260	280	300	315	330	340	350	360
CEM I en kg/m ³	108	188	202	216	227	238	293	253	260
laitier moulu en kg/m ³	46	80	87	93	97	102	52	108	111
CEM II/A en kg/m ³	122	212	229	245	257	269		286	294
laitier moulu en kg/m ³	31	53	57	61	64	67	0	71	73

Tableau 2

Extrait tableau NAF-1 : Valeurs limites applicables en France pour la composition et les propriétés du béton en fonction de la classe d'exposition avec prise en compte des additions pour le liant équivalent avec le laitier moulu.

Principales propriétés du laitier

Introduction

Le laitier de haut-fourneau granulé est surtout connu pour ses propriétés de durabilité. Elles s'expliquent en grande partie par la taille des hydrates formés, bien plus petits que les hydrates du clinker Portland. En s'hydratant, le clinker Portland libère de la chaux et rend le béton fragile car celle-ci est soluble et peut être évacuée vers la surface du béton plus ou moins poreux.

Une autre cause de la fragilité des bétons est la présence d'aluminate tricalcique (C_3A) dans les ciments Portland. En présence d'un excès de sulfates, le C_3A peut engendrer de l'expansion et fragiliser le béton par la formation d'ettringite.

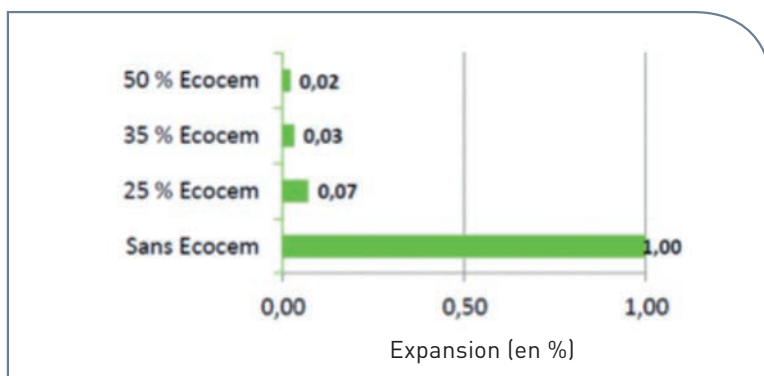


Figure 4

Mesure de l'expansion du mortier exprimé en pourcentage pour évaluer la résistance aux sulfates

Le laitier s'hydrate sans libérer de chaux et ne contient pas d'aluminate tricalcique (C_3A).

Que le laitier de haut-fourneau granulé soit incorporé aux ciments (CEM II/AS ou CEM II/BS ou CEM III/A ou CEM III/B ou CEM III/C) ou qu'il soit mis sous forme de laitier moulu au malaxeur à béton, les propriétés du laitier sont souvent semblables. Les normes admettent directement les CEM III contenant plus de 60% de laitier comme résistants aux sulfates et aux eaux séléniteuses.

Résistances aux sulfates

Dans ce cas, les sulfates représentent un contact avec des eaux séléniteuses, qui peuvent résulter d'un sous sol gypseux. L'agression des sulfates est mesurée par l'expansion du mortier normalisé, supposé rendu gonflant par la formation d'ettringite (sel de Candlot - sulfo aluminate de calcium) (Figure 4).

Résistances aux chlorures

Les chlorures posent des problèmes notamment vis-à-vis des armatures. Un taux de chlorures trop important peut engendrer des réactions de corrosion importantes pouvant aller jusqu'à des dommages dans la structure (Figure 5).

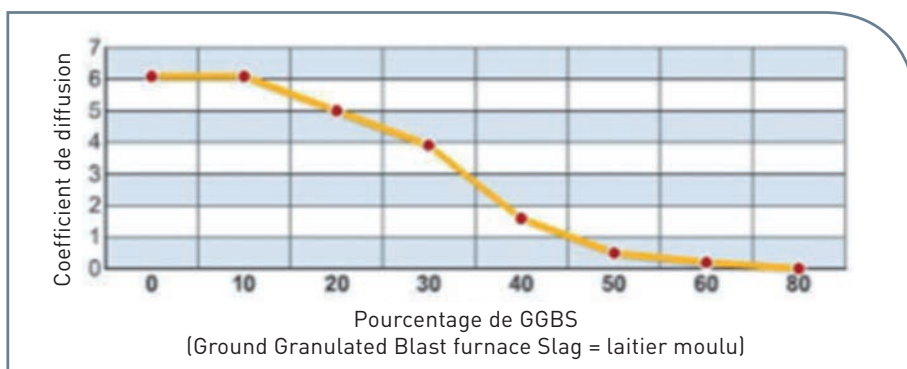


Figure 5

Diffusivité des chlorides dans le béton en fonction de sa teneur en laitier moulu

A noter :

Dans ce chapitre, le terme « Ecocem », en tant qu'appellation du producteur, renvoie au laitier moulu, introduit au béton en substitution du ciment CEM I.

Résistances aux eaux pures

Les liants à plus de 65 % de laitier ou les CEM III/B résistent à l'agression des eaux pures. Celles-ci, particulièrement déminéralisées, peuvent posséder un pouvoir de solvatation important et devenir agressives.

Résistances à l'eau de mer

Les liants à plus de 50% de laitier moulu ou CEM III/ A ou B sont reconnus résistants aux milieux marins. L'eau de mer contient principalement du chlorure de sodium à une concentration de 30g/l et du sulfate de magnésium à une concentration de 4g/l. Le laitier étant à la fois résistant aux chlorures et aux sulfates il permet d'être considéré comme « Prise Mer - PM ».

Résistances à la réaction alcali-silice

La réaction alcali-silice ou réaction alcali-granulats se traduit par une expansion du béton qui peut se produire à tout moment. L'agent responsable du phénomène d'expansion est un gel de silice qui se forme à l'intérieur même de la pâte cimentaire, à l'interface avec les granulats. La cinétique est lente et peut aller de quelques mois à quelques dizaines d'années. Il existe plusieurs essais qui déterminent la potentialité de la réaction. Parmi les mesures qui permettent d'empêcher la réaction de se produire, la mise en œuvre d'un ciment riche en laitier supprime ce risque. Un dosage supérieur à 40% est recommandé. Au-delà, on augmente la sécurité.

Résistances au feu améliorées

La sécurité des ouvrages nécessite, en cas d'incendie, des résistances au feu plus ou moins importantes en fonction de la nature de la construction. C'est particulièrement le cas dans des ouvrages enterrés de type tunnels ou des Immeubles de Grande

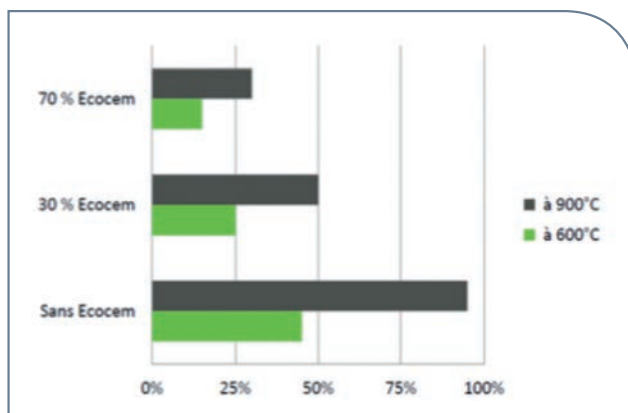


Figure 6

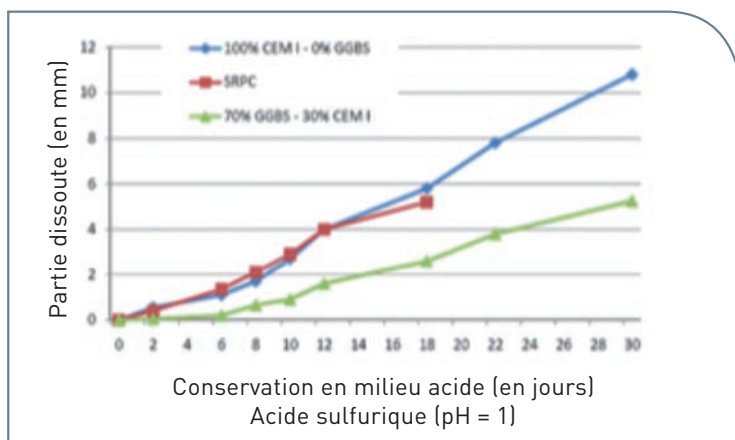
Perte de résistance sous haute température du béton en fonction de sa teneur en laitier

Hauteur (IGH). Le feu menace directement le béton en modifiant la structure de la matrice cimentaire et en interagissant avec le granulat.

Le graphique ci-dessus (Figure 6) montre que la résistance à la compression du béton diminue dès lors qu'il est soumis à des températures importantes. Nous avons pris deux exemples : en vert le béton exposé 2 heures à 600° C et en noir le béton exposé deux heures à 900°C. Sans laitier, le béton perd 40% de sa résistance à 600°C et 95% de sa résistance à 900°C. Avec 70% de laitier la perte en résistance tombe à 15% à 600°C et 30% à 900°C.

Résistances aux acides

Certains bétons sont mis en œuvre dans des conditions sévères en termes d'attaques chimiques. C'est le cas des bassins des stations d'épuration, dans les installations d'ensilage ou de stabulations agricoles. Les réactions de fermentation des matières organiques engendrent des pH faibles donc nettement acides. Pour mémoire, le béton étant un matériau basique (pH de 13 sur béton frais et 12 à l'équilibre sur béton durci), la réaction acide-base est inévitable et engendre une attaque du béton.

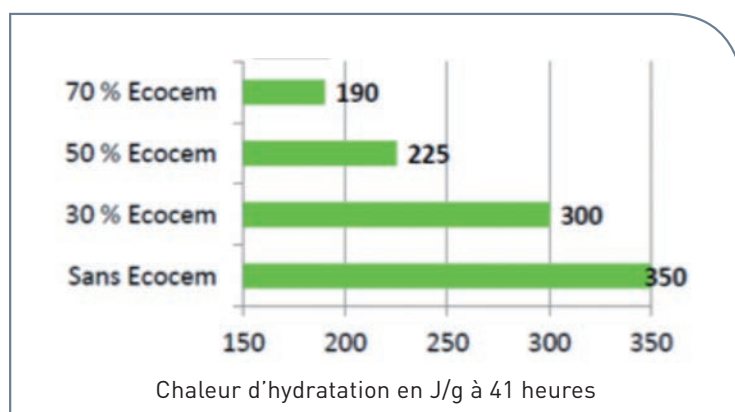
**Figure 7**

Simulation d'attaque acide sur le béton en fonction de sa teneur en laitier

Sur la figure 7, on représente une attaque acide. Les échantillons ont été conservés à pH 1 pendant 1 mois. Le laboratoire a mesuré la partie dissoute du béton en mm. Il a été comparé deux ciments, un CEM I pur et un SRPC (ciment Portland résistant aux sulfates) et une combinaison de 70% de laitier et de 30% de CEM I. Les résultats sont globalement 2 fois meilleurs.

Chaleur d'hydratation plus faible

Les réactions d'hydratation du ciment sont exothermiques et engendrent une élévation de la température. Si la chaleur pro-

**Figure 8**

Comparatif de la chaleur produite par hydratation du béton en fonction de sa teneur en laitier Ecocem

duite n'est pas correctement dissipée ou si la température est trop importante, il peut se produire un retrait thermique préjudiciable à la durabilité.

Dans notre exemple, nous avons pris un dégagement thermique du CEM I de 350 J/g à 41h. Le laitier en s'hydratant produit bien moins de chaleur que le clinker de ciment Portland. En moyenne, le coefficient est de 0.40 à 0.45 pour un laitier moulu et 1.00 pour le ciment CEM I.

Pour les bétons de grandes masses (fondations, barrages, piles de ponts, radiers), l'abaissement de la température peut représenter un bénéfice important notamment lors du coulage.

Réaction Sulfatique Interne – RSI

Il s'agit de la Réaction Sulfatique Interne mise en évidence notamment par Loic Divet à l'IFSTTAR.

Lorsque le béton contient des sulfates et si le béton a subi (en préfabrication) des températures importantes au dessus de 50 ou 60°C, il peut favoriser la formation d'une Ettringite dite secondaire (après plusieurs mois ou plusieurs années). Cette Ettringite secondaire est expansive et peut détruire le béton.

C'est un phénomène analogue au chapitre précédent sur les eaux séléniteuses.

L'ajout de laitier fait baisser la température du béton et l'absence d'aluminate tricalcique (C_3A) rend plus difficile la formation d'Ettringite, contribuant ainsi à diminuer le risque de RSI.

Les émissions de CO₂

Le ciment Portland CEM I, de par sa production, engendre une quantité de CO₂ de l'ordre de 866 kg / T ciment (source bilan GES ADEME), ce chiffre pouvant varier légèrement d'une méthode à l'autre en fonction des hypothèses et de la méthode de calcul.

Le laitier de haut-fourneau supporte une quantité de CO₂ bien plus faible, compte tenu de son processus de production, de la quantité résiduelle qui est le fait du processus de séchage, de broyage et de conditionnement. Dans le cadre d'un bilan CO₂, l'incorporation de laitier moulu a un impact important sur la solution complète et permet d'envisager des dispositions constructives « bas carbone », par rapport aux solutions conventionnelles à base de ciment Portland (CEM I et CEM II)

L'esthétique

Le laitier moulu est un produit très clair. Sa teinte le rapproche d'un ciment blanc (Figure 9) et offre ainsi des avantages esthétiques appréciables.

Il permet ainsi d'obtenir des bétons très clairs, pouvant être facilement colorés dans la masse, peu vulnérables aux micro organismes.

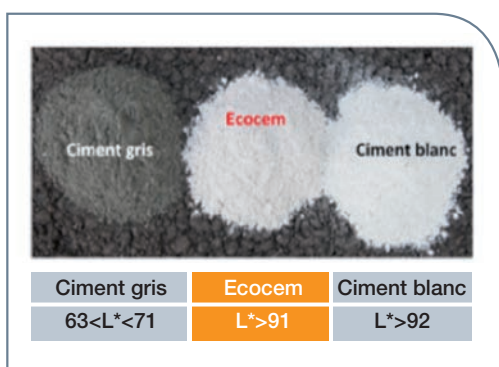


Figure 9

Ecocem a une luminance L* proche de celle des ciments blancs

Applications pour le seul laitier moulu

Bien que le laitier moulu soit principalement destiné au marché du béton, il possède d'autres propriétés lui permettant d'envisager d'autres applications. Nous pouvons citer, à titre d'exemple :

- Mortiers spéciaux, mortiers de réparation,
- Laitier ultrafin,
- Coulis, produits de comblement en milieu souterrain et/ou agressif, coulis d'injection,
- Formules adaptées à des traitements pour lesquels le ciment ne fonctionne pas, comme avec certains matériaux bio-sourcés,
-et bien d'autres encore.

Conclusion

Le laitier de haut-fourneau granulé moulu est un liant à lui seul. Il nécessite une activation, celle-ci peut se réaliser de différentes manières.

La façon la plus connue a été jusqu'ici l'association avec du clinker de ciment Portland, mais d'autres pistes de réflexion sont en cours (cf article Actislag en page 24 de ce numéro)

Des travaux de recherche assez récents ont démontré que le laitier peut être utilisé pour différentes applications où le ciment ne joue pas le rôle principal. La production de laitier de haut-fourneau est limitée et il faudra penser à optimiser l'utilisation de ce liant aux propriétés performantes et à celles qui restent encore à découvrir.

A large industrial facility, likely a cement plant, featuring several tall, grey cylindrical silos and a complex network of metal walkways and scaffolding. In the foreground, a large group of people, mostly men, are gathered. They are wearing high-visibility yellow safety vests and hard hats (some yellow, some white). They appear to be walking towards or standing near a large, dark, rectangular entrance or loading bay of the building. The overall scene suggests a formal opening or a safety briefing at a new industrial site.

Ouverture d'une nouvelle usine ECOCEM à Dunkerque

Une nouvelle usine dédiée à la valorisation des laitiers de haut-fourneau

Le 14 juin 2018 a eu lieu l'inauguration de la nouvelle usine ECOCEM France sur le port de Dunkerque, à proximité immédiate du site ARCELORMITTAL.

Cette cérémonie s'est déroulée en présence de 300 personnes, avec les dirigeants d'AMAL, d'ECOCEM Materials, de son Excellence l'Ambassadrice d'Irlande en France et des élus locaux.

Cette usine, deuxième unité française du groupe après celle de Fos-sur-Mer opérationnelle depuis 2009, a une capacité nominale de production de laitier moulu de 750 000 t/an. Les travaux préparatoires ont commencé en septembre 2016.



Intervention de Donal O'Riain, Président et fondateur d'Ecocem Materials

La réalisation de l'usine a mobilisé 47 M€ sur 3 ans. L'ouvrage emblématique est le silo principal de stockage de laitier, d'une hauteur de 38 m, avec une épaisseur de paroi de 45 cm. Réalisé entièrement en béton où le ciment a été substitué par 50 % de laitier, il repose sur un massif de fondation de 3,50 m d'épaisseur. Le silo a nécessité à lui seul 1100 m³ de béton, coulé en continu 24h/24 et 7 jours sur 7.

L'élément central de l'usine demeure le broyeur Loesche, d'une puissance installée de 3150 kW. Il permet d'atteindre un débit de 100 t/h de laitier moulu.



Port de Dunkerque avec au premier plan l'usine EcoCem en cours de construction avec son silo principal de laitier et au second plan les hauts-fourneaux Arcelormittal

ARCELORMITTAL et ECOCEM Materials se sont associés en 2007 pour créer ECOCEM France, une société en participation dont l'objectif est la valorisation du laitier de haut-fourneau. Le groupe ECOCEM Materials possède également des usines en Irlande et aux Pays Bas.

Le site ARCELORMITTAL de Dunkerque produit chaque année près de 1,6 million de tonnes de laitier de haut-fourneau. L'enjeu est la valorisation de ce flux continu de matériaux. La matière première est la veine liquide de laitier issue du haut-fourneau à 1500 °C, qui est dirigée à sa sortie vers un granulateur, où il subit une trempe extrêmement rapide avec de l'eau qui le vitrifie. Ce procédé permet de figer l'hydraulicité latente du laitier, en attente d'être activée ultérieurement.

Le produit ainsi obtenu, appelé laitier vitrifié de haut-fourneau se présente sous la forme d'un sable jaune clair, de granulométrie 0/5 mm.



Il est ensuite dirigé vers l'usine ECOCEM pour y être séché, dans un premier temps grâce aux gaz de haut-fourneau récupérés, puis broyé finement. Cette opération va conférer au laitier une granulométrie analogue à celle d'un ciment, soit 0/80 μm , et une surface spécifique Blaine désirée qui va déterminer entre autre la réactivité du laitier. Le produit final, le laitier vitrifié moulu de haut-fourneau, peut être vendu seul comme

composé hydraulique, ou en mélange dans des formulations de liants. Au niveau réglementaire, il n'est pas considéré comme un déchet, comme le confirme un courrier au CTPL du Ministère en date du 2 mars 2016.

Le laitier vitrifié moulu de haut-fourneau trouve majoritairement ses applications dans les ciments, les bétons, les liants routiers. D'autres applications sont en cours de développement comme les colles à carrelage, les produits résistants au feu, ou encore les mortiers de réparation.

L'usine va abriter une installation de mélange, et un ensemble de silos et de doseurs afin de produire les liants désirés. Le segment de marché le plus important visé est la fabrication de CEM III, appelés il y a quelques années encore « ciments métallurgiques », en raison de la substitution du clinker par du laitier.

Le laitier possède des propriétés spécifiques. Contrairement à un ciment Portland classique, la résistance d'un béton avec un ciment au laitier continue de croître dans le temps. D'un point de vue chimique, sa résistance en milieu chimique agressif (eaux séléniteuses, eaux acides, eaux douces), son inertie vis-à-vis de la réaction alcali-silice en font un composé hydraulique de tout premier choix pour les ouvrages enterrés, les tunnels, les parkings, les stations d'épuration.

Sa basse empreinte carbone permet d'économiser d'importantes quantités de CO₂ sur les solutions techniques mises en œuvre. La valorisation du flux continu de laitiers de haut-fourneau contribue ainsi pleinement à l'économie circulaire.

Les besoins en laitier à travers la France et l'Europe sont importants. Les nombreuses applications vont nécessiter des solutions logistiques adaptées.

Dans un premier temps, les expéditions se feront en vrac aussi bien en France qu'à l'export, par bateaux et camions. Des chantiers importants comme le Grand Paris sont particulièrement demandeurs de laitier dans les bétons.

D'autres chantiers récents comme le métro de Rennes, la tour « La Marseillaise », le réacteur ITER ont employé le laitier moulu pour leur réalisation.

L'usine vise la marque NF ciment, c'est-à-dire la possibilité de sortir à la porte de l'usine des ciments à la marque NF, ouvrant droit à l'obtention de la garantie décennale sous couvert du respect des DTU.

Sur les 5 millions de tonnes de laitiers produites et valorisées chaque année en France, la moitié environ (soit 2,5 millions de tonnes) est constituée par le laitier vitrifié moulu de haut-fourneau. Ce produit, au débouché certain et qui n'est pas présent sur tout le territoire, offre de réelles fonctionnalités en construction. Il représente aujourd'hui la voie préférentielle de valorisation des laitiers de haut-fourneau.

Broyeur Loesche



Révéler et développer **la valeur ajoutée** des laitiers moulus



En 2016, grâce aux efforts du CTPL et avec le soutien d'ArcelorMittal, le laitier granulé de haut-fourneau a finalement perdu son statut de déchet en France. Nous étions un des derniers pays en Europe à encore considérer comme déchet ce remarquable complément pour la production de béton et de ciment, reconnu par les normes et recommandé pour nombre d'applications à haute valeur ajoutée.

Dès 2006, Arcelor, puis ArcelorMittal, a clairement considéré que le laitier granulé devait être traité comme un produit, pour non seulement ses utilisateurs, mais également le producteur. Ce dernier a donc l'obligation d'appliquer pour le laitier granulé toutes les règles de gestions correspondantes : stratégie commerciale, assurance qualité et développement technique. C'est pour cela qu'ArcelorMittal s'est engagé, en association avec Ecocem Ltd, et avec le soutien de laboratoires français et allemands reconnus, dans le projet Actislag. Celui-ci a pour finalité de fournir enfin les réponses aux questions concernant les véritables raisons des performances du laitier granulé dans les bétons, et des moyens de les améliorer.

Qu'est-ce qui fait un bon laitier et comment l'améliorer ?

Le laitier de haut-fourneau granulé (LHF) est utilisé dans les ciments et bétons depuis plus de 100 ans. Sa composition générale est bien connue, faite d'oxyde de calcium (CaO), d'oxyde de silicium (SiO₂), d'oxyde d'aluminium (Al₂O₃), d'oxyde de magnésium (MgO) et de divers autres oxydes qui font la gangue des minerais de fer. Ils sont combinés dans une matrice vitreuse créée par le refroidissement brutal du laitier liquide à 1600°C par de l'eau à 30°C dans le granulateur. Par la suite, le LHF peut être finement broyé pour former le laitier moulu, qui sera mélangé ensuite au ciment et/ou d'autres liants, ou utilisé directement comme liant hydraulique dans les bétons, selon l'application finale (Figure 1).

La performance du laitier granulé et du laitier moulu est garantie par le suivi des règles normatives, telle que la norme NF EN 15167-1, qui impose certaines exigences techniques, essentiellement de composition chimique (Tableau 1).

PROPRIÉTÉS	EXIGENCES
CaO + SiO ₂ + MgO	> 80%
(CaO+MgO)/SiO ₂	> 1
MgO	≤ 18%
Sulfures	≤ 2.0%
Sulfates	≤ 2.5%
Perte au feu corrigée	≤ 3.0%
Chlorures	≤ 0.10%
Teneur en eau	≤ 1.0%
Finesse	> 275 m ² /g

Tableau 1
Exigences de la NF-EN 15167-1⁽¹⁾

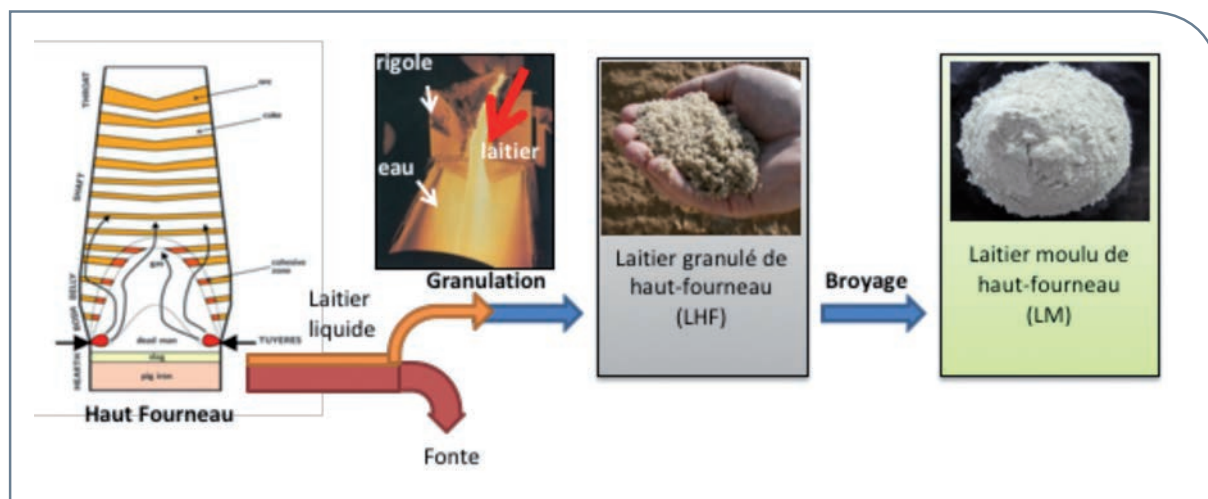


Figure 1
Du haut-fourneau au laitier moulu

Par ailleurs tous les utilisateurs de laitier ont mis au point des indicateurs plus ou moins complexes permettant de prédire la performance future du ciment ou du béton sur la base de la seule analyse chimique pour d'évidentes raisons pratiques. Pour contrôler le processus de production de la fonte, la chimie du laitier liquide est mesurée plusieurs fois par jour au niveau du haut-fourneau, avec un temps de réponse d'une vingtaine de minutes, contre des heures de préparation et jusqu'à 28 jours d'attente pour l'indice d'activité (rapport entre la tenue mécanique d'un mortier fait uniquement de portland, et un mortier incluant du laitier moulu). Quelques exemples sont :

Indice de basicité

$$\frac{\text{CaO} + \text{MgO}}{\text{SiO}_2}$$

Indice hydraulique

$$\frac{\text{CaO} + \text{MgO} + \text{Al}_2\text{O}_3}{\text{SiO}_2}$$

Indice Cléret de Langavan

$$20 + \text{CaO} + \text{Al}_2\text{O}_3 + 0,5 \times \text{MgO} - 2 \times \text{SiO}_2$$

Indice « F »

$$\frac{\text{CaO} + 0,5 \times \text{MgO} + \text{Al}_2\text{O}_3 + 2,25 \times \text{S}}{\text{SiO}_2 + \text{MnO}}$$

Sur la base d'une longue expérience, il a été établi que les laitiers donnant les meilleures performances comme liant hydraulique présentent des valeurs élevées d'indice⁽²⁾. Plus un laitier est performant, plus il est capable de se substituer au ciment Portland, et dans des proportions similaires, dans un liant composé. A nouveau, un certain nombre de règles normatives en France et en Europe définissent actuellement les limites d'utilisation, comme la norme EN 206-1. Ces règles sont toutefois conçues pour garantir une performance minimale, valable pratiquement pour tous les laitiers produits dans le monde, sans réelle distinction.

Cependant, dans un contexte de forte réduction des émissions de CO₂, et donc de nécessaire augmentation des additifs

moins carbonés que le clinker Portland, il est certain que ces règles vont évoluer vers une approche plus fine et plus performante. Il deviendra possible d'utiliser les laitiers à leur potentiel maximum et donc d'améliorer l'empreinte CO₂ des activités de construction, et les sidérurgistes les plus vertueux dans la démarche qualité et environnementale gagneront un avantage compétitif, qui pourra se traduire au niveau international, dans un contexte de grande concurrence avec les sidérurgistes non européens.

En plus de soutenir cette démarche normative, il est donc naturel pour tout sidérurgiste de chercher à générer un laitier très performant, et donc à forte valeur ajoutée. Les indices mentionnés précédemment pointent clairement les leviers à utiliser pour améliorer cette performance : plus de chaux, plus d'alumine, moins de silice. Hélas, ce n'est pas si simple.

La problématique et les compétences à mettre en œuvre

La qualité des laitiers de haut-fourneau a toujours été un sujet très complexe, aussi bien pour les producteurs que pour les utilisateurs.

- Les sidérurgistes contrôlent les teneurs en chaux, alumine et silice selon les impératifs du process sidérurgique (qualité des matières premières, tenue mécanique du minerai aggloméré, chimie de la fonte visée, etc.). Dévier de cette optimisation, même si la valeur du laitier est améliorée, aboutit dans l'immense majorité des cas à un surcoût, que les sidérurgistes sont prêts à accepter étant donné leur engagement sur la qualité du laitier généré, mais toutefois jusqu'à une certaine limite.

- Les indices sont utiles dans des contextes spécifiques fournisseur/consommateur réguliers et permettent d'anticiper d'éventuelles déviations quant aux caractéristiques des laitiers sur la base de plusieurs

années d'expérience et de formulations stables. Malheureusement, ces indices pris hors contexte ne permettent pas de prédire exactement comment un laitier va se comporter. De plus, les éléments mineurs suspectés d'avoir un rôle sur la réactivité des laitiers, tels que le titane et les alcalins, ne sont généralement pas pris en compte, ou peuvent être limités de façon semi-empirique par sécurité.

- Enfin, l'impact du processus de granulation lui-même, essentiellement réalisé en France par le processus INBA⁽³⁾ (Figure 2), est encore mal compris. Le but originel de la granulation est de fournir un laitier refroidi, facilement manipulable pour être déplacé loin de la zone de production. Lorsque les propriétés hydrauliques du LHF ont été découvertes, il a été compris très rapidement que la structure vitreuse de la matière était une caractéristique essentielle. Ce taux de verre a été incorporé dans les normes, avec une valeur minimum à atteindre à 66% (NF EN 196-1). Cependant, tout comme pour la chimie, il existe une grande disparité dans la performance des laitiers selon un taux de verre à 70, 85 ou 99%. De même que pour les indices, il est admis qu'un taux de verre le plus élevé possible est souhaitable, mais des études réalisées⁽⁴⁾ montrent qu'un laitier 100% vitrifié n'est pas nécessairement meilleur qu'un laitier vitrifié à 95%. De plus, pour des raisons logistiques, économiques et environnementales, des contraintes additionnelles sur le processus

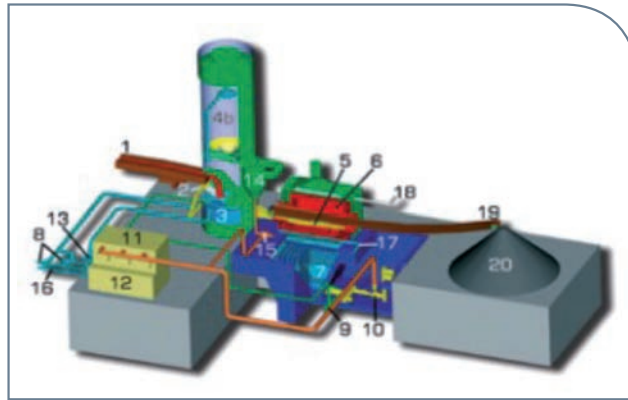


Figure 2
Granulation "INBA" par Paul Wurth
1. Arrivée de laitier liquide, 2-3. Pot de granulation, 4b. Tour de condensation, 5-6. Tambour d'essorage, 7-18. Système de collecte et de recyclage de l'eau, 19-20. Bande transporteuse et laitier granulé

de granulation sont apparues, comme le captage intégral de la vapeur d'eau créée lors de la trempe, l'augmentation des débits de laitier liquide à traiter, suivant l'augmentation de la taille des hauts-fourneaux et la diminution de l'humidité du laitier granulé final pour aider à son séchage et rendre son transport moins onéreux. Toutes ces contraintes impactent l'aspect minéralogique (phases vitreuses) et physique (granulométrie, porosité, ...) des laitiers granulés produits.

Une fois le problème clairement posé, on constate qu'il est impossible pour un seul des acteurs de la chaîne de réaliser seul un projet visant la compréhension de la réactivité des laitiers et la mise au point de méthodes d'améliorations, notamment pour la réactivité du laitier moulu à court terme (résistance mécanique à 2 et 7 jours, Figure 3).

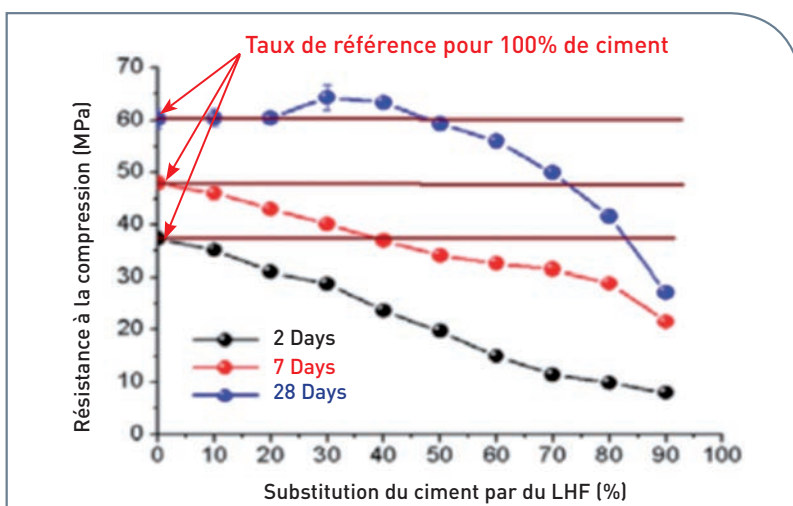


Figure 3
Résistance mécanique d'un mortier à 2, 7 et 28 jours, selon le taux d'addition de LHF^[5]

De multiples champs de compétences sont nécessaires :

- Des experts du génie civil qui ont pu étudier des laitiers de hauts-fourneaux des sources les plus variées en Europe et dans le monde et qui peuvent avoir une vision très large des performances possibles.
- Des experts de la chimie du solide, habitués aux éléments présents dans le LHF et capables des analyses les plus avancées.
- Des experts des matrices vitreuses, qui forment plus de 90% du LHF et qui sont tout à fait différentes des cristaux observés dans le clinker par exemple.
- Des experts de la formulation des bétons et des méthodes permettant l'amélioration des performances des bétons contenant des niveaux élevés d'addition.
- Des experts de la fabrication et de la vente du laitier moulus, connaissant parfaitement les attentes des clients finaux et les contraintes du processus de broyage.
- Et enfin, des experts de la génération de la fonte et du laitier liquide, qui maîtrisent le LHF dans son état initial et qui connaissent les contraintes de production (haut-fourneau et granulation).

Depuis 2015, ArcelorMittal travaille à l'organisation d'un consortium regroupant toutes ces compétences, dans le but de lancer un projet ambitieux qui pourra répondre aux questions posées. Après un an d'échanges, les partenaires de ce qui allait devenir le projet ACTISLAG ont été rassemblés :

- Le FEhS - Institut für Baustoff-Forschung, un laboratoire allemand reconnu au niveau international pour son expertise sur les laitiers sidérurgiques, et qui depuis 1954 a étudié les chimies et les performances de LHF venant de dizaines de sources différentes dans des conditions contrôlées et reproductibles. De plus, le FEhS dispose d'installations pilotes permettant la fusion et la granulation de LHF.
- Le CNRS CEMHTI, un laboratoire français spécialisé sur les matériaux placés en conditions extrêmes de température ou d'irradiation, tels que les réfractaires, les verres et les laitiers. Le CEMHTI est capable des analyses les plus poussées pour

déterminer la structure des cristaux et des verres grâce aux techniques spectroscopiques ou atomiques.

- L'Université Technique de Clausthal, un laboratoire allemand possédant un département spécialisé sur la recherche et la caractérisation des verres. Leur intérêt est porté sur les phénomènes de nucléation et de cristallisation dans les matériaux amorphes, ainsi que sur les impacts de la température et de la cinétique sur la formation des verres.
- Le LMDC-Université de Toulouse III, un laboratoire français focalisé sur la durabilité et les aspects environnementaux des matériaux cimentaires. Le LMDC dispose de connaissances et de matériels avancés pour la caractérisation physico-chimique et mécanique des matériaux cimentaires, notamment à base de LHF.
- Ecocem Materials Ltd, le plus grand producteur indépendant de laitier moulu en Europe, avec 4 usines en Irlande, aux Pays-Bas et en France. Ecocem commercialise du laitier moulu fabriqué en majeure partie avec les LHF d'ArcelorMittal et est donc particulièrement sensible à sa qualité, tout en connaissant les possibilités et les limites de l'activation des laitiers granulés en conditions industrielles.
- Et finalement ArcelorMittal, au travers de son centre de recherche de Maizières-lès-Metz en France, qui reste le meilleur connaisseur du laitier de HF initial, aussi bien au niveau de la richesse des données autour du haut-fourneau, qu'au niveau des outils informatiques et pilotes qui permettent d'imaginer toutes les possibilités de modification, tout en gardant une approche réaliste de faisabilité.

Sur la base de ce consortium solide et complémentaire, ArcelorMittal a déposé en 2016 une demande de financement auprès du Fond Européen de Recherche sur le Charbon et l'Acier (RFCS), pour le projet dénommé « ACTISLAG - Nouvelles routes d'activation du laitier de haut-fourneau granulé, pour la résistance aux jeunes âges ».

Un sujet européen et un soutien européen

L'objectif du projet, défini en accord entre les deux industriels du projet, ArcelorMittal et Ecocem, vise très clairement à déterminer les moyens réalistes d'améliorer la performance du laitier moulu dans les formulations des bétons aux jeunes âges (Figure 4). C'est en effet une limite connue des utilisateurs du laitier moulu et qui restreint l'utilisation du laitier à haute proportion dans les formules. Cette limite doit être dépassée en comprenant les mécanismes réels de la réaction du laitier lors de son hydratation et comment les développer, soit chez le sidérurgiste, soit chez le producteur de laitier moulu, en perturbant le moins possible les pratiques industrielles en œuvre. ArcelorMittal et ses partenaires sont convaincus de l'intérêt de cette démarche de recherche pour l'ensemble de la filière sidérurgique et du génie civil en Europe.

Du point de vue des producteurs d'acier, l'intérêt est commun et stratégique. Il s'agit tout d'abord de pérenniser la valorisation des laitiers dans les filières à haute performance, alors que le processus de production de la fonte devient de plus en plus complexe, notamment du fait de la pression sur les matières premières de la sidérurgie et des objectifs de qualité de la fonte. Si les mécanismes de réaction du LHF sont enfin clairement compris et ne sont plus affectés par les éléments de contexte local, il deviendra bien plus simple d'anticiper toute perturbation et donc de systématiquement utiliser les quantités les plus élevées de LHF dans les formulations des bétons. En combinaison avec des actions possibles également au niveau des broyeurs à laitier et permettant de repousser plus loin les limites d'addition, c'est l'ensemble de la filière du ciment au laitier qui en sera renforcée.

L'Europe a exporté encore en 2017 plus de trois millions de tonnes de laitier vers les autres continents, et plusieurs sites sidérurgiques disposent de stocks importants de laitiers disponibles. Or, la production de LHF

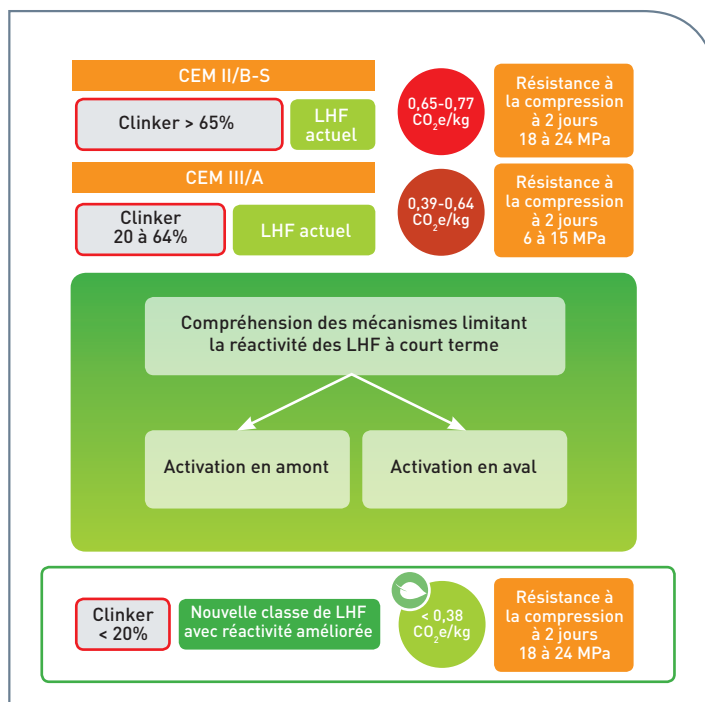


Figure 4
Résumé des objectifs du projet ACTISLAG

en Europe est estimée à environ 25 millions de tonnes, soit moins de 15 % de la consommation européenne de ciment⁽⁶⁾. Les marchés domestiques ont donc la capacité d'absorber ces volumes additionnels de LHF, sans perturbation majeure de la filière génie civil, et tous les sidérurgistes peuvent y trouver leur place.

Pour les professionnels de la construction, l'intérêt est également évident, notamment si l'on se place sur une perspective environnementale. L'industrie du ciment et du béton a listé dans plusieurs publications les voies d'améliorations de leur empreinte carbone, l'une de ces voies étant l'augmentation des additifs en remplacement du clinker. Ce n'est pas une voie simple car le clinker reste un produit très performant et, dans l'état actuel de l'art, est difficile à remplacer dans les situations où la performance à court terme du béton est essentielle. La démarche d'ACTISLAG se place exactement dans cet objectif, et vise clairement la diminution de l'empreinte CO₂ d'un liant tout en conservant ses performances dès le

court terme, les performances à long terme du laitier étant déjà largement établies.

Cette situation a été exposée au comité du RFCS, qui applique les objectifs définis par le Conseil Européen dans sa décision 2008/376/EC. Un de ces objectifs consiste notamment au développement de solutions avancées d'écologie industrielle, incluant l'amélioration de l'utilisation des coproduits de la sidérurgie. La qualité du consortium constitué pour ACTISLAG, combinée aux enjeux établis au niveau européen, a convaincu le comité du RFCS d'accorder son soutien financier au projet, lors de l'attribution des fonds pour l'année 2017. Le budget total du projet ACTISLAG, devant durer 4 ans, a été établi à 2,8 millions d'euros entre les 6 partenaires. La contribution du RFCS se monte à 1,7 millions, soit près de 60 %.

Les premiers résultats et les travaux à venir

Les travaux ont débuté au mois de juillet 2017, sur la base d'un échantillonnage de laitiers provenant de 16 sources différentes, dont deux hors d'Europe, suivi d'une caractérisation classique de leur composition, de leurs propriétés physiques et de leur réactivité respective. De ces 16 sources, une première sélection a été effectuée sur les LHF les plus intéressants (haute teneur en TiO_2 , en Al_2O_3 , différentes porosités/densités,

différents granulateurs pour des chimies identiques), pour se recentrer finalement sur 8 échantillons.

Ces 8 échantillons ont été l'objet d'une seconde série d'analyses, cette fois à un niveau bien plus avancé⁽⁷⁾. On peut notamment citer l'usage de la résonance magnétique nucléaire (RMN) pour la compréhension de la structure vitreuse des laitiers granulés. Un verre est un réseau tri-dimensionnel plus ou moins ordonné d'atomes, et la RMN permet de mesurer le degré de désordre de ce réseau, ce qui a un impact lorsque le laitier commence à réagir avec les constituants du béton. À la suite de ces analyses, il a été déterminé qu'un réseau très ordonné (que l'on appelle aussi haut degré de polymérisation) est un frein pour la réactivité du LHF à très court terme. On a, de plus, pu démontrer une bonne corrélation entre les mesures (par exemple le décalage du Si observé en RMN) et une formule théorique qui décrit le degré de polymérisation d'une structure vitreuse (le « number of non-bridging oxygen/tetrahydon » NBO/T) qui aidera à la prédiction de la réactivité (voir Figure 5),

On peut aussi mentionner l'emploi du microscope électronique à transmission (MET) qui a permis de détecter la présence de cristaux de silice de taille nanométrique dans la structure vitreuse. De même, des cristaux de silico-aluminates ont été détectés dans les laitiers les plus réactifs. Mais les mécanismes expliquant les impacts de ces cristaux ne sont pas encore bien compris. Ils peuvent aussi bien jouer le rôle de désorganiseurs du réseau vitreux, ou de sites préférentiels pour que les réactions chimiques avec les autres éléments chimiques du béton s'initient plus rapidement.

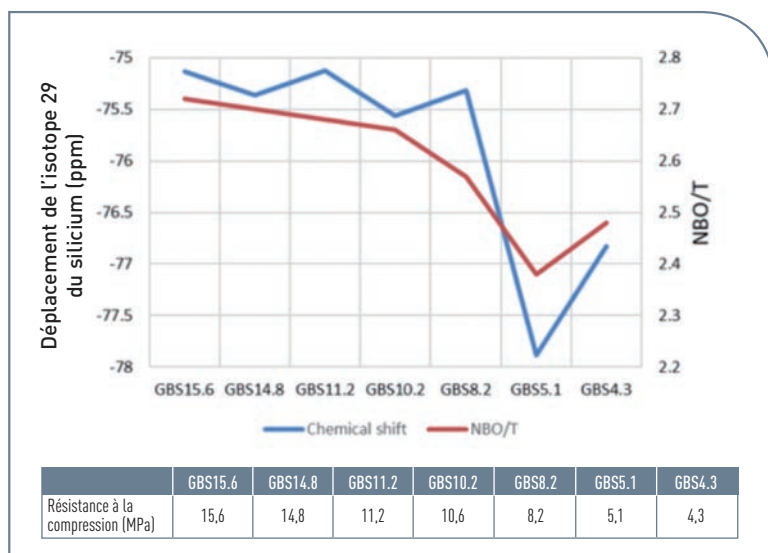


Figure 5

Mesure du déplacement de l'isotope 29 du Si, et valeur NBO/T calculée, comparée à la résistance mécanique à 2 jours d'un mortier contenant 75% de LHF, pour 7 sources différentes.

Ces premiers résultats sont très encourageants, car ils nous indiquent les bonnes pistes pour les améliorations. Les propositions de modification des paramètres qui jouent un rôle clé sur la performance du LHF pourront être aussi pertinentes qu'innovantes. Quand ces propositions sont également estimées comme raisonnables et réalisables, il devient judicieux de les tester à l'échelle pilote, par la fabrication au centre de recherche d'ArcelorMittal, de dizaines de kilogrammes de laitiers modifiés, qui seront à leur tour analysés et testés pour leurs performances. Ces premiers laitiers modifiés ont été produits dès le printemps 2018. Leur structure minéralogique et leur réactivité est en ce moment même évaluée dans les laboratoires des partenaires.

Cependant, le projet ACTISLAG considère une autre voie pour l'amélioration de la performance du laitier. Il est aussi envisagé de tester les différents activateurs pouvant être utilisés une fois que le laitier a été moulu. Et dans le même principe que pour la modification du laitier liquide, il s'agit de renforcer les critères de sélection des activateurs candidats. Les travaux dans ce sens ont commencé en mai 2018 et sont en cours.

Une fois sélectionnées les voies d'améliorations les plus efficaces, selon leur degré de complexité, leur coût et leur performance, la dernière étape du projet consiste à imaginer comment les implémenter au niveau industriel. ArcelorMittal et Ecocem ont déjà l'expérience de procédés permettant ces modifications, et par conséquent les contraintes sont bien connues. Cela rend cette dernière étape encore plus difficile, mais encore plus concrète.

En conclusion, après un peu plus d'un an de travaux, le projet ACTISLAG a établi une démarche claire pour atteindre un objectif ambitieux. Mais même avec la capacité de réaliser des essais de taille significative, il reste un monde entre un laboratoire et un broyeur à laitier, un granulateur ou un haut-fourneau. Des années de travail seront encore nécessaires. Mais les partenaires

industriels Ecocem et ArcelorMittal sont convaincus que cette démarche de long terme est indispensable et que le LHF doit bénéficier d'un programme de recherche pour le futur. Parce que le laitier de haut-fourneau est un véritable produit.

Le projet Actislag a reçu le financement du Fond de Recherche du Charbon et de l'Acier, sous la convention de subvention N°74809.

Bibliographie :

- (1) NF EN 15167-1:2016
- (2) Ehrenberg A, Influence of the granulation conditions and performance potential of granulated blast furnace slag - Part 2: Chemistry and physical properties, ZKG International, 2013, Vol 66, Issue 3, p 60-67
- (3) [http://brochures.paulwurth.com/iron/technologies/brochures/\(Brochure\)-INBA-System-en.pdf](http://brochures.paulwurth.com/iron/technologies/brochures/(Brochure)-INBA-System-en.pdf)
- (4) Meng B, Mineralogy of slag and significance for reactivity in cement, 6th International Congress on Applied Mineralogy, 2000
- (5) Danezan A, Understanding of the difference in reactivity of granulated blast furnace slags by a multiscale structural characterization, 15th International Conference on the Physics of Non-Crystalline Solids, 2018
- (6) CEMBUREAU, Activity Report 2013 - Available online, <http://www.cembureau.eu/activity-reports>
- (7) Danezan A, Understanding of the difference in reactivity of granulated blast furnace slags by a multiscale structural characterization, 15th International Conference on the Physics of Non-Crystalline Solids, 2018

Que sont devenus les laitiers en 2017 ?



Comme chaque année et pour la treizième année consécutive, le Centre Technique et de Promotion des Laitiers sidérurgiques (CTPL) a lancé en 2018 l'enquête nationale relative aux flux de laitiers sidérurgiques produits sur le territoire national en 2017. Cette enquête vise également à recueillir les données relatives à leurs principales filières d'utilisation par différents secteurs industriels.

La consolidation des données (cf. tableau 1) fait apparaître une stabilisation de la production depuis plusieurs années aux alentours de 5 millions de tonnes. La production d'acier dépend fortement des marchés de l'automobile et de la construction, qui sont liés à des cycles courts et de la commande publique en matière de logements.

Le tableau 1 suivant illustre l'évolution des productions de ces dernières années.

L'année 2017 confirme les grandes tendances à savoir :

- Une légère augmentation de la production de laitier de haut-fourneau granulé, et ceci au

détriment du laitier de haut-fourneau cristallisé, ce qui démontre l'intérêt de la granulation à destination du marché des ciments et des liants.

- Une stagnation de la production des laitiers d'aciérie de conversion liée aux aciers plats, en accord avec un marché de l'automobile stable en Europe.

- Une stabilité pour les laitiers d'aciérie issus de la filière carbone, directement dépendants du marché de la construction, pour lequel la commande publique de logements est en berne.

Tableau 1

Synthèse des productions de laitiers en France en 2017 :

TYPE DE LAITIERS		2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
LHF	LHF totaux	3 639	2 329	3 079	2 847	2 866	3 081	3 407	2983	3003	3034
	LHF granulés	2 814	1 772	2 442	2 323	1 902	2 127	2 682	2185	2310	2572
	LHF cristallisés	825	557	637	524	964	954	725	798	693	462
Laitiers d'aciérie de conversion		1 235	807	1 069	1 136	1 135	1 258	1 187	1265	1072	994
Laitiers d'aciérie électrique (aciers carbone)		578	575	579	617	637	516	503	442	420	423
Laitiers d'aciérie électrique (aciers inox et alliés spéciaux)		348	131	200	231	216	206	211	185	173	172
Total		5 800	3 842	4 929	4 831	4 855	5 061	5 308	4875	4668	4623

Laitiers de haut-fourneau

La production de laitiers de haut-fourneau s'établit pour l'année 2017 à 3,03 millions de tonnes, issues des sites Arcelormittal de Fos-sur-Mer et Dunkerque, ainsi que du site Saint-Gobain de Pont-à-Mousson. Le ratio entre la partie cristallisée (16%) et celle granulée (84%) montre un changement significatif dans la gestion des veines liquides.

1- Le site Arcelormittal de Florange ne produit plus de laitiers de haut-fourneau depuis 2012 suite à l'arrêt de la filière chaude (mise sous « cocon » en avril 2013).

La figure 1 montre qu'une majorité des tonnages produits (81%) sont valorisés sous forme de laitier vitrifié pour la production de liants hydrauliques par l'industrie cimentière et les opérateurs spécialisés à destination de la construction de bâtiments et d'ouvrages (ciments et additions du béton) et de façon plus marginale, de la technique routière (liant hydraulique routier).

En 2017, 14% des laitiers de haut-fourneau, générés sous forme cristallisée, ont été valorisés comme granulats en technique routière. D'autres filières d'utilisation du laitier de haut-fourneau cristallisé, encore marginales (3%), tendent à se développer, par exemple pour la fabrication de laine de roche.

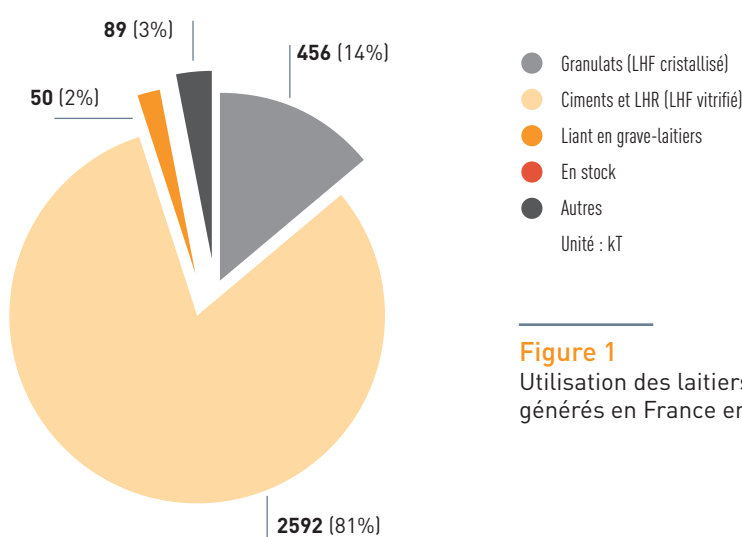


Figure 1

Utilisation des laitiers de haut-fourneau générés en France en 2017

Laitiers d'aciérie

Les 21 réponses reçues de la part des 25 sites sidérurgiques français produisant des laitiers d'aciérie représentent plus de 99% des tonnages de laitiers d'aciérie produits annuellement en France, à savoir près de 1,6 millions de tonnes pour l'exercice 2017, stable par rapport à 2016.

Parmi les laitiers d'aciérie, on peut distinguer trois grandes familles :

Les laitiers de convertisseur (LAC)

Les laitiers de convertisseur à oxygène (appelés aussi laitiers LD), issus de la filière fonte représentent 56% des tonnages de laitiers d'aciérie produits en 2017 (près de 900 kT). Il faut préciser que l'enquête a été beaucoup plus détaillée et a conduit à des chiffres plus précis en matière de laitiers de convertisseur au sens propre.

Il est à noter que la quantité de LAC valorisés est légèrement supérieure à celle produite, ce qui montre une amélioration sur ce type de produits avec la baisse de mise en stock. Il reste encore beaucoup à faire sur ce segment avec en particulier la mise à profit du taux de chaux libre.

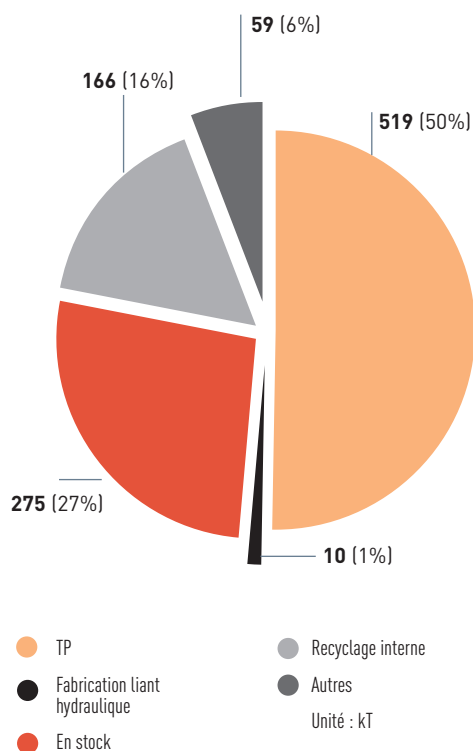


Figure 2

Orientation des laitiers de convertisseur générés en France en 2017

Les laitiers d'aciérie électrique issus de la filière aciers carbone (LAFE carbone)

Ils représentent 22,4 % des tonnages de laitiers d'aciérie produits en 2017, soit un peu plus de 350 kT.

Compte tenu des propriétés intrinsèques de ces laitiers, l'essentiel des tonnages (83%) est utilisé comme granulats en technique routière. Il faut noter une amélioration sensible de la mise en stock puisque nous sommes passés de 16 % en 2016 à 9 % en 2017. Les opérations de mise en stock pour maturation peuvent avoir une incidence sur l'évaluation de ces tonnages.

Le nouveau marché de la construction observé en 2016 avec 2 % des volumes se confirme cette année avec 2,41 %. En revanche, le recyclage interne a été particulièrement bas avec 1,3 %. Les autres usages plus marginaux sont toujours présents avec 3,52 % (filage de laine de roche, la fabrication d'amendements, l'utilisation pour le traitement d'eaux usées, ou encore la valorisation comme tout venant pour la constitution de buttes paysagères ou de merlons phoniques).

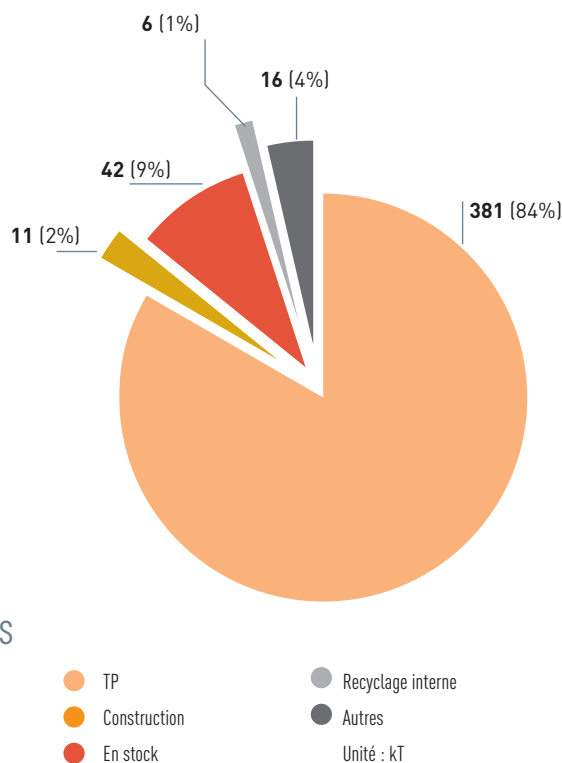


Figure 3

Utilisation des laitiers d'aciérie électrique issus de la filière carbone en 2017

Les laitiers d'aciérie électrique issus de la filière aciers inoxydables et alliés (LAFE inox et alliés)

Ils représentent 9,56% des tonnages de laitiers d'aciérie produits en 2017, soit environ 150 kT.

Les caractéristiques techniques de ces laitiers étant très similaires à celles des laitiers d'aciérie électrique issus de l'élaboration des aciers carbone, les filières de valorisa-

tion restent également assez semblables :

- 71% sont utilisés en technique routière, en recul par rapport à 2016 (80 %), à mettre en miroir avec l'augmentation de la mise en stock interne.
 - 7,7% en traitement de récupération des fractions métalliques et oxydes des laitiers,
 - 18,5% vont en stockage interne en attente de débouchés, (13,2 % en 2016).
 - 2,47% utilisés en recyclage interne.
- Aucun tonnage de ces laitiers n'est orienté vers le stockage réglementé.

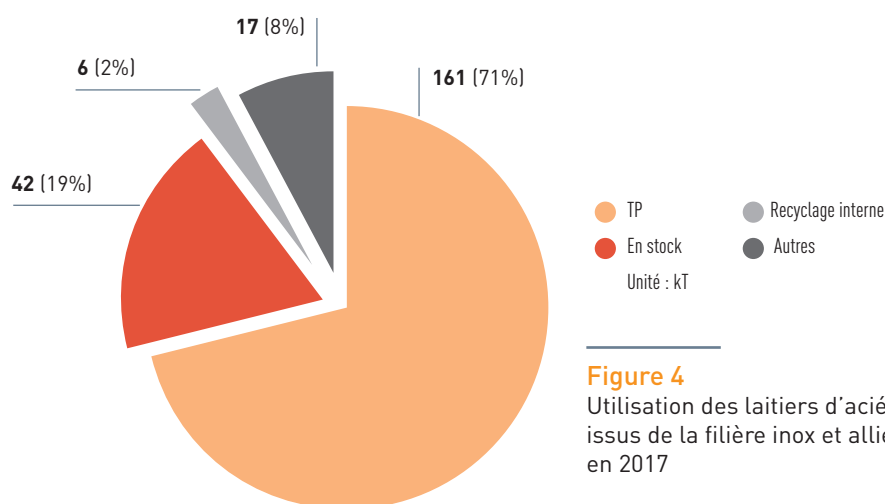


Figure 4

Utilisation des laitiers d'aciérie électrique issus de la filière inox et alliés spéciaux en 2017

Gestion des stocks historiques

A la fin de l'année 2017, les stocks de laitiers recensés restent encore importants à l'échelle du territoire (près de 40 millions de tonnes), en particulier pour les laitiers de haut-fourneau cristallisés issus du passé (XIX^{ème} et XX^{ème} siècles – environ 25 millions de tonnes), ou encore les laitiers de convertisseur issus de la filière fonte (environ 14 à 15 millions de tonnes), stocks auxquels la sidérurgie ne s'est réellement intéressée qu'à partir des années 2000.

En comparaison, et compte tenu de la « jeunesse » des installations concernées (<30 ans) et de leurs caractéristiques intrinsèques, il n'existe que très peu de stocks de laitiers issus de la filière électrique (estimés à environ 1 million de tonnes).

Cependant, compte tenu des besoins et des possibilités locales, plusieurs initiatives sont actuellement en cours sur différents sites sidérurgiques pour l'exploitation de ces stocks historiques. D'ores et déjà, c'est entre 0,7 et 1,0 million de tonnes de ces « crassiers » qui sont exploités, valorisés et mis sur le marché chaque année, prouvant s'il en est encore besoin, l'intérêt technique et économique de ces ressources minérales secondaires durables.

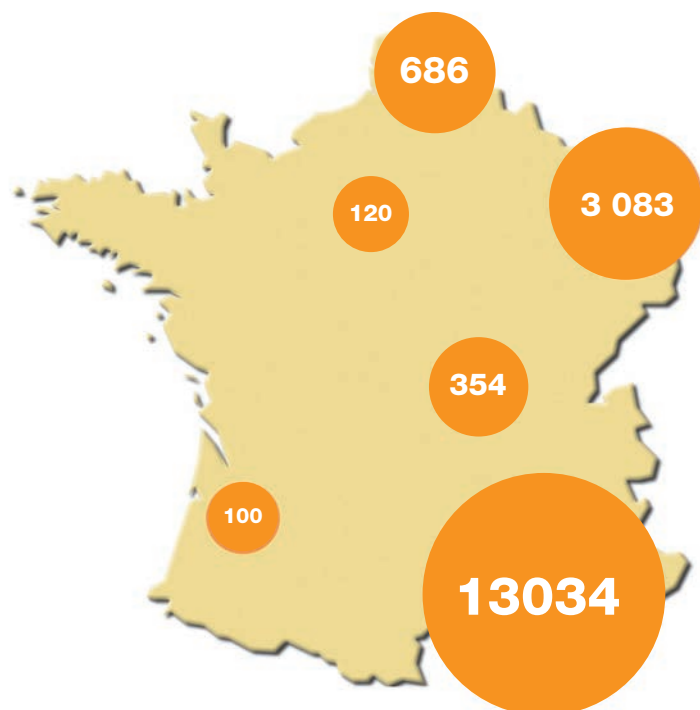


Figure 5

Répartition géographique des stocks de laitiers d'acierie sur le territoire en 2017

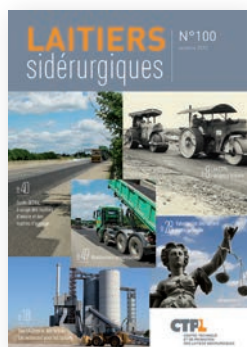
● LAC
Unité : kT

Pour plus d'information, vous pourrez évidemment retrouver en ligne la présentation synthétique de ces données sur le site internet du CTPL.
Rendez-vous à l'adresse suivante :

<http://www.ctpl.info/wp-content/uploads/2018/04/Stats-LHF-2017-2016.pdf>

<http://www.ctpl.info/wp-content/uploads/2018/04/Stats-laitiers-acierie-2017-2016.pdf>

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

Jérémy 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

Jérémy Domas : CTPL

• **Réalisations remarquables**

• **Les laitiers HF et d'aciérie : quel avenir pour les 20 prochaines années ?**

Perspectives économiques, réglementaires et techniques quant à la valorisation des laitiers sur les 20 prochaines années.

Jean-Marie Delbecq : BSME

N° 101 (juillet 2013)

• **Une valorisation en béton !**

Valorisation en granulats pour béton des laitiers provenant de l'élaboration des aciers inoxydables en filière électrique

Gildas Adegoloye :

L2MGC, Université de Cergy-Pontoise

Anne-Lise Beaucour :

L2MGC, Université de Cergy-Pontoise

Sophie Ortola :

L2MGC, Université de Cergy-Pontoise

Albert Noumowe :

L2MGC, Université de Cergy-Pontoise

• **Analyse du cycle de vie du laitier de haut-fourneau granulé moulu**

Jacques Reynard : CTPL

• **Des laitiers très protecteurs**

Valorisation des laitiers LAFE comme granulats dans des blocs d'enrochement en béton

Benjamin Laclau : Nobatek

Bruno Bouquet : T.S.V.

N° 102 (juin 2014)

• **Les produits laitiers, c'est bon pour la santé !**

Evaluation des risques pour la santé humaine liés à l'utilisation des laitiers sidérurgiques en construction routière

Dr Deborah Proctor

• **Des laitiers bons pour le service !**

Evaluation des risques sanitaires liés à l'utilisation de laitiers de convertisseur

Laurent Butez : SGA

N° 103 (octobre 2014)

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

Valorisation des laitiers d'aciérie de conversion : influence des conditions de refroidissement sur la nature et la taille des phases minérales

J. Poirier, G. Thévenin, C. Duée, C. Bourgel :

CEMHTI, CNRS UPR3079/Université d'Orléans

M. Gautier : INSA de Lyon

D. Poirier : ArcelorMittal Maizières,

Research and Development

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

Production et devenir des laitiers sidérurgiques en 2013 en France.

Jérémy Domas : CTPL

• **Des laitiers à fort potentiel**

Granulation à sec des laitiers de haut-fourneau avec récupération de chaleur

Ian J McDonald : Siemens VAI

Métaux Technologies, Royaume Uni

Andrea Werner : Siemens VAI

Métaux Technologies, Autriche



N° 104 (mai 2015)

• Avec les LAC, ça pousse !

Amendement des sols. Les laitiers sidérurgiques et leurs usages agricoles : un marché pérenne à fort potentiel.

Marc Fixaris : ArcelorMittal B.S.M.E

• Les laitiers au secours de l'agriculture ! Etats-Unis.

Caractéristiques et apports des laitiers sidérurgiques en usages agricoles.

Mary Provance-Bowley :

Harsco Metals and

Minerals - Sarver, PA, USA

N° 105 (Octobre 2015)

Eaux en danger !

Les laitiers d'aciérie s'attaquent au phosphore

Chad PENN : Professeur Associé

Oklahoma State University -

Department of Plant and Soil Science

• Que sont devenus les laitiers en 2014

Production et devenir des laitiers sidérurgiques en 2014 en France

Jérémie Domas : CTPL

• Eaux usées :

Les laitiers démontrent leur efficacité

Florent Chazarenc : Ecole des Mines de Nantes

Marc Fixaris : Arcelormittal/BSME

N° 106 (Juin 2016)

• Expansion des laitiers d'aciérie :

à l'ouest, il y a du nouveau !

Utilisation des laitiers sidérurgiques en tant que matériaux granulaires :

modèles prédictifs d'expansion

volumique et critères d'exploitabilité

George WANG et Yuhong WANG : 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 !

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

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



LAITIERS
sidérurgiques

www.ctpl.info