

# LAITIERS sidérurgiques

N°113

Décembre 2021

page 6

**Actualaitiers**

page 34

**Que sont devenus  
les laitiers en 2020 ?**



Production des laitiers et leurs principales filières d'utilisation par les différents secteurs industriels en 2020.

page

10

**GRANULATION DU LAITIER  
DE HAUT-FOURNEAU**

**Une nouvelle alternative**

**CTPL**

CENTRE TECHNIQUE  
ET DE PROMOTION  
DES LAITIERS SIDÉRURGIQUES

# ecart



# Vers de nouveaux horizons

Pour les fidèles lecteurs de notre revue Laitiers Sidérurgiques, ce sera forcément une surprise, voire un choc de ne pas retrouver la célèbre et virevoltante plume de Jacques Reynard à la signature de cet édito. En effet, cela faisait maintenant près de 20 ans que Jacques nous distillait avec bonheur ses bons mots, ainsi que ses humeurs ... ou ses « coups de gueule » lorsque le contexte du moment le touchait. C'est donc avec une certaine appréhension, une grande responsabilité envers mes prédécesseurs, mais également un très grand honneur que je me vois investi de cette mission aujourd'hui.

C'est donc forcément sur ce premier point que je souhaite insister pour ce premier édito. Merci Jacques !... oui, merci pour tout le travail et tout ce que tu as pu apporter dans la professionnalisation de la filière des laitiers sidérurgiques. Merci également pour toutes les batailles que tu as pu mener au nom de l'ensemble des Adhérents du CTPL. Merci enfin personnellement à tout ce que tu as pu nous apporter techniquement et humainement. C'est un vrai challenge que tu nous proposes aujourd'hui de reprendre les rennes du CTPL, et pour moi une véritable fierté de prendre la suite dans la rédaction de cet Editorial de notre revue.

Tout comme l'année 2020, l'année 2021 n'aura pas été une année simple pour l'industrie sidérurgique, même si le contexte économique et les conditions de marché auront été très bénéfiques. Le fonctionnement des sites, dans un contexte sanitaire une fois de plus dégradé compte tenu du COVID 19, aura nécessité une très grande flexibilité et une adaptabilité de tous les instants, et une rémanence constante. La demande étant heureusement là cette année, c'est la fiabilité des sites et des installations - avec plus ou moins de bonheur - qui constituait la priorité pour nos Adhérents.

A l'heure où une révolution industrielle s'engage pour notre profession, compte tenu de la nécessaire décarbonisation des procédés pour respecter des objectifs européens très ambitieux, il devient d'autant plus essentiel que des filières pérennes pour la valorisation des laitiers puissent se mettre en place sur les sites. De nombreux projets de recherche et de propositions innovantes sont en cours de développement afin que les laitiers puissent disposer à l'avenir de débouchés prometteurs. C'est d'ailleurs en ce sens que nous publions dans ce numéro 113 de Laitiers Sidérurgiques les résultats de différents projets successifs auxquels nos collègues du FEHS ont pris part. Même si le procédé de granulation par voie sèche des laitiers de haut-fourneau n'est pas tout nouveau, ces travaux constituent sans doute l'étude la plus complète et la plus aboutie sur le sujet. La comparaison des caractéristiques des laitiers de haut-fourneau granulés par voie humide (classique) et par ce procédé par voie sèche permet de mieux comprendre le potentiel que cette technique pourrait ouvrir. Sous réserve de pouvoir développer et maîtriser également la récupération de chaleur associée, et donc la production d'énergie, la génération de laitiers granulés par voie sèche pourrait constituer une véritable alternative durable aux procédés existants aujourd'hui. Ceci pourrait d'ailleurs permettre à l'avenir des réflexions intéressantes pour les laitiers d'aciérie. Ainsi, une nouvelle ère se profile pour notre industrie. De nombreux challenges s'offrent à nous et le CTPL reste mobiliser pour répondre à l'ensemble de ces nouveaux défis !

Je profite également de cette opportunité pour souhaiter à l'ensemble de nos Adhérents, et à nos fidèles lecteurs, de bonnes fêtes de fin d'année et un joyeux Noël à toutes et à tous.

Jérémie DOMAS  
*Délégué Général du CTPL*

## page **10** Granulation du laitier de haut-fourneau : **Une nouvelle alternative**

La transformation du laitier de haut-fourneau en fusion en laitier de haut-fourneau granulé se fait par un refroidissement brutal à l'eau, destiné à le vitrifier, ce qui lui confère un comportement hydraulique latent.

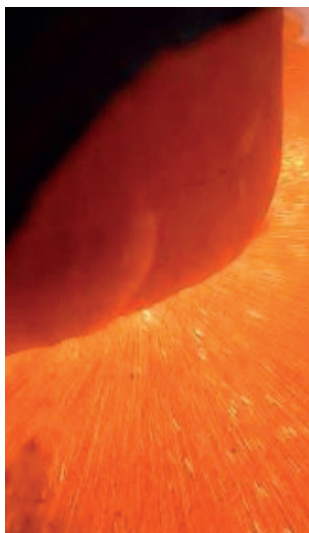
Ce procédé conventionnel présente néanmoins les inconvénients suivants :

- le laitier granulé ainsi obtenu présente une humidité résiduelle de 10% en masse
- et l'énergie thermique contenue dans le laitier en fusion n'est pas valorisée. Cette énergie est estimée entre 1,6 et 1,8 GJ/t.

Depuis près de 10 ans, plusieurs travaux de recherche visent à développer des procédés de granulation à sec et à obtenir un matériau aux mêmes propriétés qu'un laitier de haut-fourneau conventionnel. Cependant, le laitier granulé à sec s'avère moins réactif malgré une teneur en verre élevée comparable.

L'étude menée par le FEhS en partenariat avec l'université technologique de Clausthal (Allemagne) montre que la réactivité du laitier de haut-fourneau granulé à l'eau dépend de son enthalpie et de sa vitesse de refroidissement élevées.

*A. EHRENBURG, FEhS, Institut de recherche de matériaux de construction, Duisbourg.  
N. ROMERO SARCOS, D. HART, H. BORNHÖFT, J. DEUBENER, Université de Technologie de Clausthal, (Allemagne)*



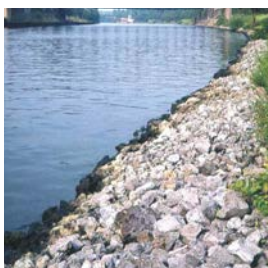
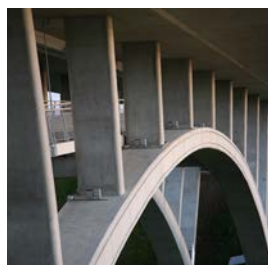
## Que sont devenus les laitiers en 2020 ?



Comme chaque année et pour la quinzième année, le Centre Technique et de Promotion des Laitiers sidérurgiques (CTPL) a lancé en 2021 l'enquête nationale relative aux flux de laitiers sidérurgiques produits sur le territoire national en 2020.

Cette enquête vise également à recueillir les données relatives à leurs principales filières d'utilisation par différents secteurs industriels.

*Shahinaz SAYAGH - CTPL*



### LAITIERS SIDÉRURGIQUES

75<sup>ème</sup> année

Revue éditée et diffusée  
gratuitement par le CTPL

#### Directeur de la publication

Jérémie DOMAS,  
Délégué Général

#### Rédacteur en chef

Shahinaz SAYAGH,  
Directrice

#### 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](http://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 : Adobe  
Stock, CTPL,

N° ISSN 1166 - 3138

Dépôt légal :

2<sup>ème</sup> semestre 2021

## Fonctionnement du CTPL

### Réunions du CA et de l'AG du CTPL

Les prochaines réunions du Conseil d'Administration (CA) et de l'Assemblée Générale (AG) du CTPL se tiendront le 6 décembre prochain.

## Conférences et congrès internationaux

• **Slag Valorisation Symposium**, la 7<sup>ème</sup> édition du colloque SVS, organisée par KU Leuven (Belgique), s'est tenue en distanciel du 27 au 29 avril 2021 sous le thème de la neutralité carbone et de l'utilisation efficace des ressources. Ce congrès biannuel, a été une opportunité d'échanger sur les pratiques bas carbone (DRI, électrolyse ...), de granulation à sec et leur influence sur les caractéristiques des laitiers en vue de leur valorisation. Le CTPL a participé en ligne à ce symposium.

• **Conférence annuelle de la National Slag Association (N.S.A.)**, le séminaire annuel organisé par la NSA s'est tenu du 29 août au 1<sup>er</sup> septembre 2021 à Orlando en Floride. Compte tenu des conditions sanitaires en cours, le CTPL n'a pas participé cette année à ce séminaire.

• **Wascon 2021 : Production et utilisation durable de matériaux alternatifs comme produits de construction**, compte tenu du contexte sanitaire lié au COVID-19, le congrès international WASCON, organisé par l'ISCOWA, initialement prévu en juin 2021 est repoussé à 2022. Cette conférence constitue un lieu privilégié où les travaux scientifiques innovants sur le comportement environnemental de l'utilisation de laitiers sont régulièrement publiés.

• **11<sup>ème</sup> conférence EUROSLAG**, la 11<sup>ème</sup> édition de la conférence européenne d'Euroslag a également été également reportée en 2022.



### Conseil d'Administration d'EUROSLAG

Au cours des 12 derniers mois, plusieurs réunions du Conseil d'Administration d'EUROSLAG se sont tenues : les 1<sup>er</sup> juillet et 24 novembre 2020 et les 19 mai et 24 novembre 2021, toutes par correspondance compte tenu des conditions sanitaires liées au COVID-19.

L'objectif était de réunir les Administrateurs et experts pertinents afin d'échanger sur les principes de base d'une réorganisation technique, administrative et financière pour optimiser les actions d'EUROSLAG. Cela a conduit à l'élaboration d'une proposition avancée qui doit être présentée et discutée avec l'ensemble des Membres de l'association.

Depuis 2020, c'est l'AFOCO qui a repris le poste d'Administrateur pour la France, en alternance avec le CTPL. M. Jérémie DOMAS y a participé afin de faire valoir l'expérience du CTPL, et l'approche que la France soutiendrait lors de ces travaux.

### Réunion de l'Assemblée Générale d'EUROSLAG

Deux réunions de l'ensemble des Adhérents de l'Association européenne des producteurs et opérateurs de laitiers sidérurgiques, EUROSLAG, se sont tenues le 1<sup>er</sup> juillet 2020 et le jeudi 26 novembre 2021 par correspondance. 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.

### Réunion des Groupes de Travail d'EUROSLAG

Une réunion des groupes de travail d'EUROSLAG s'est tenue, en distanciel, le mercredi 19 mai 2021. Des groupes thématiques (réglementaire, technique et environnemental) ont été mis en place suite à l'adoption de la stratégie Euroslag 2025, lors de l'assemblée générale de novembre 2019, afin de promouvoir l'utilisation des laitiers en Europe.

### Travaux d'EUROFER / EUROSLAG

#### Fertilisants - JRC by-products report

Les projets d'actes délégués de la CE sur les matériaux STRUBIAS ont été mis en consultation publique en début d'année 2021 ; ils devraient être publiés en début d'année 2022. Quant à eux, les laitiers sidérurgiques devraient être intégrés comme matériau constitutif de la catégorie CMC 11 en tant que « sous-produits ». Des éléments techniques ont donc été adressés au Joint Research Center (JRC) au nom d'Euroslag, rédigés conjointement par le FEHS et le CTPL en janvier 2021. Les premières propositions de critères pour la CMC11 ont été faites fin novembre par la Commission Européenne (DG Grow), et une consultation publique devrait avoir lieu rapidement début 2022. Le CTPL participe activement à ces travaux au nom d'EUROSLAG.

#### Allocation CO<sub>2</sub> des laitiers sidérurgiques

L'allocation économique semble être la méthode recommandée pour les laitiers de haut-fourneau par le Comité Européen de Normalisation TC 350, même si des divergences existent au sein du groupe d'experts EUROFER sur l'élaboration de la fiche de déclaration environnementale produit des laitiers



de haut-fourneau granulés. Ce choix est important car la méthode retenue devra s'appliquer à tous les laitiers.

### REACH Ferrous Slag Consortium

La dernière réunion du Consortium REACH Ferrous Slag s'est tenue en distanciel, le jeudi 29 octobre 2020. Elle portait essentiellement sur la révision du Chemical Safety Report et l'enregistrement de nouvelles substances.

## Réglementation nationale et européenne

### Application du Règlement européen sur les fertilisants

La Commission Européenne a finalisé la publication au JOUE le 5 juin 2019 du règlement européen n°2019/1009 couvrant l'usage de tous les fertilisants, y.c. les amendements minéraux basiques pour lesquels les laitiers de convertisseur sont utilisés. Il s'appliquera à compter du 16 juillet 2022, date à laquelle il remplacera définitivement l'ancien Règlement (CE) 2003/2003. Pendant cette période de transition, les deux Règlements coexistent.

Au niveau national, le Ministère de l'Agriculture (MAAF) et la DGCCRF réfléchissent actuellement à la rédaction d'un décret, dit « socle commun », qui permettrait de mettre à jour la réglementation actuelle sur les fertilisants, en intégrant les premières dispositions du règlement européen. Ce texte apporterait également une mise à jour sur les modalités de demandes d'AMM (arrêté ministériel dédié), et sur la SSD des matières qui peuvent servir à la fabrication des fertilisants (arrêté ministériel dédié). Il viserait également à une meilleure articulation avec les normes d'application obligatoire en vigueur actuellement.

En parallèle, une étude a été réalisée par le BE RITMO pour évaluer l'impact économique potentiel de ces mesures pour les professionnels ainsi qu'une

expertise de l'ANSES sur les différentes propositions du projet de décret. Une nouvelle consultation des parties prenantes a été lancée par le Ministère de l'Agriculture (DGAL) le 28 octobre 2021. Le CTPL a répondu à cette consultation et participera à la réunion de synthèse organisée le 7 décembre prochain.

D'un point de vue normatif, la révision de la norme NF U44-001 pour intégrer les laitiers de convertisseur criblés (< 4 mm) a officiellement été inscrite au programme de travail de la commission (GT AMB). Le CTPL est partie prenante et force de proposition sur ce sujet et est en charge de rédiger le dossier technique qui supportera cette demande au BN FERTI. Ce dossier devra être accepté par le GT AMB, puis porté au sein de la commission DSM « Dénomination, Spécification, Marquage ».

### Application de la Directive EURATOM

La Directive 2013/59/EURATOM du 5 décembre 2013 fixe les normes de base en matière de protection sanitaire contre les dangers résultant de l'exposition aux rayonnements ionisants. Publiée au J.O. le 17 janvier 2014, les Etats Membres doivent transposer cette directive en droit national au plus tard le 6 février 2018.

En France, la transposition de cette Directive, en particulier via l'arrêté du 3 juillet 2019 relatif aux caractérisations

radiologiques de matériaux, matières, produits, résidus ou déchets susceptibles de contenir des substances radioactives d'origine naturelle », impose que les produits de construction soient caractérisés à compter du 1<sup>er</sup> juillet 2020. Un guide d'aide aux professionnels du bâtiment a ainsi été rédigé en juin 2020 : « Radioactivité naturelle des produits de construction - Recommandations pour l'application pratique des dispositions réglementaires ».

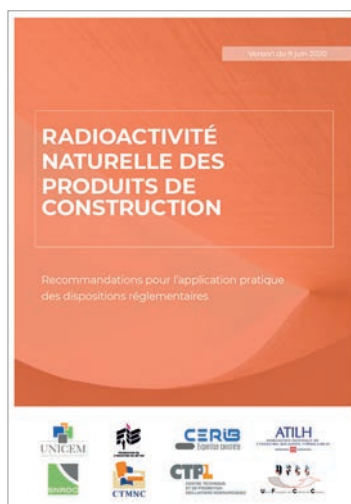
Pour les laitiers sidérurgiques, cette problématique ne concerne que les laitiers de haut-fourneau, fabriqués à partir de minerais de fer et de charbons. Les laitiers d'aciérie, eux, ne concentrent pas les radioéléments d'origine naturelle. Ceci a d'ailleurs été confirmé par un programme de caractérisation mené par le CTPL en 2021.

### Guide méthodologique sur la construction

Le groupe de travail (GAMAC) vise à encadrer les conditions environnementales et sanitaires pour l'usage de matériaux alternatifs pour certains usages en construction (Bâtiment et Génie civil), et rédiger un guide opérationnel et prescriptif des conditions et limitations pour ces usages.

Plusieurs réunions sur le sujet se sont tenues en 2018 et au premier semestre 2019, afin de définir les scénarii d'exposition et les méthodes retenues pour quantifier les émissions et maîtriser l'impact environnemental et sanitaire de l'emploi des matériaux alternatifs en construction. Cependant, faute de pouvoir trouver un compromis sur une méthodologie globale simple et applicable à l'ensemble des situations rencontrées, le MTES et le CEREMA ont décidé en fin d'année 2019 de scinder le guide en deux cas : l'utilisation des matériaux en aménagements (PST sous dallage, plateformes, merlons...); l'utilisation des matériaux pour la fabrication de produits de construction.

Une première réunion du sous-groupe relatif à l'usage de matériaux alternatifs en aménagements s'est tenue le 21 janvier 2020, afin de présenter les premières orientations pour ce guide.



Plusieurs autres réunions se sont tenues et la dernière version du projet a été transmise à la DGPR pour examen en février 2021. Depuis, l'ensemble des professionnels reste en attente des derniers arbitrages du Ministère de l'Environnement (DGPR) sur les aspects méthodologiques. Ces travaux devraient reprendre plus activement en 2022.

## **SRC - Schémas régionaux des carrières**

Les régions françaises avaient normalement l'obligation de mettre en place d'ici 2020 leurs schémas des carrières incluant les ressources minérales primaires et secondaires (ou « alternatives »). A cette fin, les laitiers sidérurgiques sont intégrés dans le processus pour les régions concernées. La plupart des régions ont ainsi bien avancé en sollicitant les principales parties prenantes. Le CTPL participe à ces réunions et représente la profession, en particulier pour la région Auvergne Rhône-Alpes (AuRA), la région PACA, la région des Hauts de France, ainsi que dans la région du Grand Est.

Cependant, les conditions sanitaires liées au COVID-19 ont bouleversé la finalisation de la plupart des SRC. Les réunions et les actions se multiplient en 2021, afin d'avancer dans l'élaboration des différents SRC.

### **• SRC AuRA**

Dans cette région, les travaux sont terminés et aucune nouvelle initiative n'a été engagée.

### **• SRC PACA**

La 3<sup>ème</sup> réunion du comité de pilotage du SRC PACA s'est tenue le 27 mai dernier en visioconférence. Un état des lieux de l'avancement et des principales orientations du schéma ont été présentés. La consultation administrative obligatoire sera lancée en début d'année prochaine, avant l'approbation par le Préfet.

### **• SRC Hauts-de-France**

La ressource « laitiers » est une ressource secondaire importante dans les Hauts-de-France, où trois sites sont implantés, les volumes produits en 2019 (2,8 Mt) ont été transmis à la DREAL des Hauts-de-France le 5 mars 2021 en vue de préparation du dernier COPIL du 15 avril 2021 au cours duquel un diagnostic de déchets inertes et matériaux

de BTP dans le Nord et le Pas-de-Calais a été présenté par la Cellule Economique Régionale pour la Construction (CERC) des Hauts-de-France.

### **• SRC Grand-Est**

Seules les thématiques relatives aux ressources primaires, au transport et à la remise en état des carrières / réaménagement ont été abordées lors des derniers COPIL (5 février et 19 mars 2021). Un inventaire (2019) de la ressource « laitier » dans la région Grand-Est a été fourni par le CTPL ainsi que les filières les utilisant en substitution des ressources primaires.

## **Normalisation**

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

Depuis la fin de l'année 2018, la révision du DTU 13.3 sur la réalisation des dallages industriels a été lancée. L'intégration de l'utilisation des matériaux alternatifs dans l'annexe A géotechnique, et en particulier des laitiers sidérurgiques pour ces travaux est une évolution logique et attendue. Le DTU a été envoyé en enquête publique au début de l'année 2020, des réunions de dépouillement ont eu lieu de novembre 2020 à mai 2021. Il a été publié en juin 2021.

### **CEN/TC 51 - Ciment et liants hydrauliques**

Trois réunions de la Commission nationale Ciments se sont tenues en 2021, en mars, en juin et en septembre. A noter en particulier la publication en France de la nouvelle norme NF EN 197-5 sur les nouveaux ciments.

Par ailleurs, de plus en plus d'échanges et de discussions ont lieu sur les aspects environnementaux et sur les performances environnementales des ciments (bas carbone). Plusieurs groupes ad hoc se sont constitués dans le cadre du WG6 du TC51. Ceci est particulièrement intéressant et pertinent dans le cadre de l'usage des laitiers sidérurgiques pour les applications dans l'industrie des liants hydrauliques.

La prochaine réunion se tiendra le 7 décembre prochain.

### **CEN/TC104 - Bétons**

La révision du complément national de la norme bétons (NF EN 206/CN) progresse et est toujours en cours.

Un nouveau groupe d'experts relatif aux Solutions Bétons Bas Carbone (GE SBC) a également été mis en place, animé par le CERIB. Deux réunions (juillet et novembre) ont eu lieu, et ont permis d'établir quatre « Task Forces » (TF) :

- Une TF sur l'utilisation des matériaux alternatifs, visant à établir un cahier des charges de type FD ;
- Une TF sur la terminologie et le vocabulaire ;
- Une TF sur les liants reconstitués ;
- Une TF qui réfléchira à l'établissement d'une base de données des retours d'expériences de formulations « bas carbone » qui dérogent aux règles habituelles.

Le CTPL et ECOCEM sont activement impliqués dans ces travaux.

### **CEN/TC154 - Granulats**

Beaucoup de normes granulats sont bloquées pour des raisons de manquements au mandat et/ou au Règlement Produit de Construction (RPC). Selon la CE, les spécifications harmonisées actuelles sont insuffisantes car elles ne couvrent pas tous les produits mis sur le marché ni les 7 exigences fondamentales du RPC. La CE évalue les produits à couvrir, les exigences à inclure et les priorités à donner aux normes des produits de construction, en considérant : les besoins réglementaires des Etats, les questions de sécurité, les problèmes environnementaux, les volumes concernés et les volumes transfrontaliers ainsi que les ressources disponibles.

La publication de l'Acte délégué « granulats » est repoussé et les normes Produit ne seront pas publiées avant 2 ou 3 ans.

Le TC154 a décidé de supprimer les Work Items des projets de norme de spécifications et de fusionner les normes EN 12620 (Granulats pour béton), EN 13139 (Granulats pour mortier), EN 13043 (Granulats pour mélanges hydrocarbonés), EN 13242 (Granulats pour matériaux traités aux liants hydrauliques) en une seule EN 17555, qu'on appellera « norme combinée »,



de scinder le contenu en deux parties, l'une soumise à mandat (partie 1) et l'autre d'application volontaire (partie 2) et d'annuler la norme 16236 et en rapatrier son contenu dans la partie 1. Le projet a été envoyé à l'enquête CEN.

La CE a lancé une enquête sur la révision du RPC qui se termine le 31 août. 5 options sont sur la table qui vont graduellement de « aucun changement législatif » à « abrogation du RPC ».

Les résultats d'une pré-enquête, montrent que tous les Etats ont voté pour le maintien en l'état du RPC.

Le WG10 (enrochements) poursuit son programme de travail en parallèle. Il en est de même pour la norme sur les ballasts (prEN 13450).

Pour la normalisation française, il faut noter le sous groupe dédié à la révision de la NF P18-545. Cette norme doit être adaptée pour tenir compte de l'évolution des textes européens. La position est de ne pas créer de nouvelles classes qui ne seraient pas auparavant définies dans une norme européenne. L'enquête publique s'est close le 15 septembre 2019. Il y a eu 7 approbations, et aucune opposition.

## **CEN/TC 351 – Emission de substances dangereuses réglementées à partir de produits de construction**

### **• WG 1 – Emission dans les sols et les eaux**

Deux réunions de ce groupe de travail ont eu lieu en 2021, le 10 mai et 5 juillet à distance. L'année 2021 a été marquée par la poursuite des travaux sur la transformation des trois spécifications techniques de la série CEN/TS 16637 en normes européennes :

- CEN/TS 16637-1 : Guide pour la spécification des essais de lixiviation ;
- CEN/TS 16637-2 : Essai de lixiviation dynamique de surface ;
- CEN/TS 16637-3 : Essai de percolation à l'écoulement ascendant.

Ces normes EN intègrent les résultats de validation réalisés en 2017/2018, qui même s'ils apparaissent assez peu satisfaisants, permettront aux utilisateurs de disposer des éléments concernant la répétabilité et la reproductibilité de ces méthodes en fonction des paramètres (minéraux ou organiques).

La série des trois normes européennes prEN 16637 a été soumise à l'enquête CEN du 25 février au 20 mai 2021. Les trois projets de norme ont été approuvés.

### **• WG 3 – Emission de radioéléments naturels contenus dans les produits de construction**

Ce groupe de travail élabore les procédures harmonisées à mettre en œuvre pour mesurer l'émission de radiations des produits de construction utilisés en bâtiment, en lien avec l'application de la nouvelle directive européenne (2013/59/EURATOM) relative aux normes de base en matière de radioprotection.

- Travaux du TG 31 « Rayonnements gamma »

Une réunion a eu lieu en 2021, le 1<sup>er</sup> juin. Les travaux concernent la poursuite du projet de transformation de la spécification technique CEN/TS 17126 « Mesurage des concentrations de radioactivité des rayonnement gamma », publiée en 2018, en norme européenne. L'objectif du TG 31 est de réaliser la validation inter laboratoire des données présentées dans le TS.

- Travaux du TG 32 « Modélisation de la dose »

Les travaux portent sur la poursuite du projet de norme européenne WI 00351032 sur l'évaluation de la dose de rayonnement gamma émis par les produits de construction basé sur le rapport technique CEN/TR 17113 « Produits de construction - Evaluation du relargage des substances dangereuses - Evaluation de la dose de radiation gamma émise » publié en 2017. La dernière version du WI a été finalisée. Le projet est approuvé à l'issue de l'enquête CEN.

## **CEN/TC396 – Terrassements**

Au niveau des terrassements, les principales avancées portent sur la révision du GTR et sur les travaux du groupe européen TC396/WG7 dédié aux matériaux alternatifs en terrassement. Les travaux de révision du GTR ont bien avancé et la publication du guide est attendue au 1<sup>er</sup> trimestre 2022.

## **Travaux français du BN FERTI**

En 2021, les travaux de normalisation du BN FERTI et de la commission DSM

se sont poursuivis au ralenti, en attente de l'évolution de la réglementation européenne et nationale.

En effet, la Commission Européenne a préparé un mandat à destination du CEN/TC260 visant à répondre à tous les besoins pour l'application du Règlement européen publié en 2019 et qui s'appliquera à partir de juillet 2022.

Par ailleurs, de nombreux travaux sur des normes nationales ont été mis en stand by, la profession restant en attente du contenu des textes législatifs du « socle commun » qui devraient être publiés en 2022.

# **Communication**

## **Revue de presse**

Depuis 2021, une revue de presse trimestrielle est diffusée auprès des adhérents du CTPL. Celle-ci recense les dernières réalisations à base de laitiers sidérurgiques, autant d'exemples mettant à disposition des acteurs de la filière des solutions constructives.

## **E-catalogue**

Le E-Catalogue produits a été mis à jour sur le site web du CTPL. Les fiches techniques Produit (lorsque disponibles) des produits élaborés à partir de laitiers provenant des sites sidérurgiques adhérents, fabriqués et commercialisés par ses membres associés sont librement accessibles à l'adresse : <https://www.ctpl.info/trouver-un-produit-commercialise/>

## **Journée Technique de l'AFOCO**

Le CTPL a participé à la Journée Technique de l'AFOCO, qui s'est tenue le mercredi 20 octobre 2021 à Marseille. La thématique de cette journée était la suivante : « Créer des matériaux alternatifs écologiques et performants à partir de co-produits industriels pour construire un avenir responsable et durable ». L'occasion pour le CTPL de présenter l'état des lieux de la valorisation des laitiers sidérurgiques produits en France.

# Granulation du LHF : Une nouvelle alternative



La transformation du laitier de haut-fourneau en fusion en laitier de haut-fourneau granulé se fait par un refroidissement brutal à l'eau, destiné à le vitrifier, ce qui lui confère un comportement hydraulique latent.

Ce procédé conventionnel présente néanmoins les inconvénients suivants :

- le laitier granulé ainsi obtenu présente une humidité résiduelle de 10% en masse
- et l'énergie thermique contenue dans le laitier en fusion n'est pas valorisée. Cette énergie est estimée entre 1,6 et 1,8 GJ/t.

Depuis près de 10 ans, plusieurs travaux de recherche visent à développer des procédés de granulation à sec et à obtenir un matériau aux mêmes propriétés qu'un laitier de haut-fourneau conventionnel. Cependant, le laitier granulé à sec s'avère moins réactif malgré une teneur en verre élevée comparable.

L'étude menée par le FEhS en partenariat avec l'université technologique de Clausthal (Allemagne) montre que la réactivité du laitier de haut-fourneau granulé à l'eau dépend de son enthalpie et de sa vitesse de refroidissement élevées.

A. EHRENBURG

FEhS, Institut de recherche de matériaux de construction, Duisbourg  
N. ROMERO SARCOS - D. HART - H. BORNHÖFT - J. DEUBENER,  
Université de Technologie de Clausthal, (Allemagne)

### Introduction

Chaque année, près de 310 millions de tonnes de laitiers de haut-fourneau (LHF) sont produits dans le monde. Le laitier est généralement utilisé, granulé, sous forme broyée en cimenterie comme un substitut de clinker ou comme addition minérale pour béton. Les pratiques actuelles de granulation reposent sur la trempe du LHF sous forme liquide au sein d'installations utilisant des quantités importantes d'eau.

Depuis une dizaine d'années, plusieurs travaux de recherche visent à développer des procédés de granulation à sec (air) des LHF en matériaux vitrifiés [1]. Cette technologie devrait permettre non seulement de réaliser de grosses économies d'eau, de limiter les émissions de  $H_2S$  et  $SO_2$ , et surtout de récupérer l'énergie thermique contenue dans les laitiers afin d'alimenter les haut-fourneaux (générer de la vapeur ou de l'énergie électrique) [2-3].

Par ailleurs, un projet de R&D lancé en 2011 par Primetals Technologies (ex Siemens VAI) en collaboration avec l'université de Loeben en Autriche a permis de mettre au point un procédé de granulation des LHF par dispersion du laitier en fusion (liquide) à l'aide d'une coupelle rotative suivi d'une installation pilote industrielle de refroidissement à l'air, en 2013, sur le site sidérurgique de Voestalpine Stahl de Linz.

Le FEhS avec l'université de Technologie de Clausthal ont participé à ces travaux, achevés en 2019, qui visaient à définir les propriétés hydrauliques des LHF granulés à sec en vue de leur utilisation dans l'industrie cimentière.

### Granulation à sec et par voie humide des laitiers de haut-fourneau

Au milieu du XIX<sup>ème</sup> siècle, la granulation des LHF par trempe a permis de traiter des quantités considérables de laitiers. C'est encore le cas aujourd'hui pour les laitiers de métaux non ferreux. Des formulations de mortiers à base de laitiers aux performances éprouvées ont été mises au point dès 1862 par Emil Langen (Friedrich-Wilhelms-Hütte) [8]. Cependant, compte tenu des volumes de plus en plus importants de laitiers, liés à la taille des hauts-fourneaux, et des débits de plus en plus élevés (jusqu'à 12 t/mn), le procédé de granulation par voie humide s'est progressivement imposé au dépend des procédés alternatifs tels que la granulation à sec, semi-humide, ou à tambours rotatifs. Par ailleurs, d'autres inconvénients étaient également mentionnés pour ces procédés alternatifs, comme des taux de vitrification fluctuants [9].

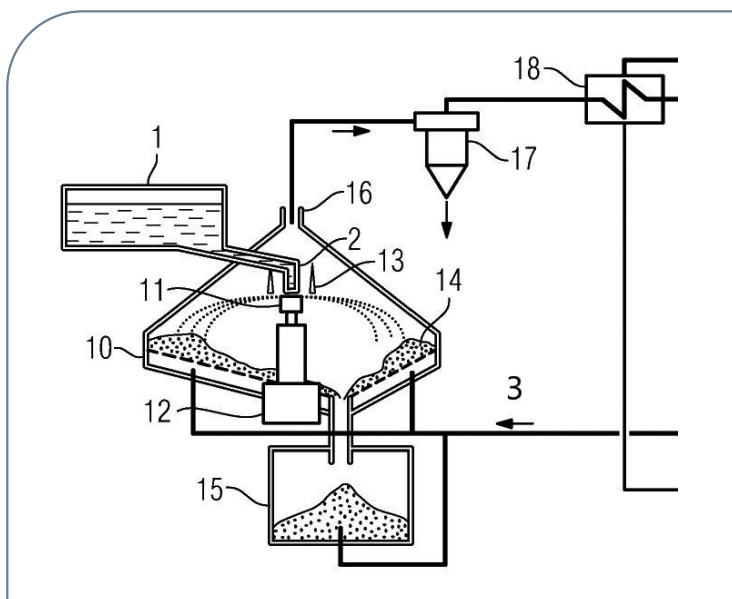
Dans les années 1990, un prototype de granulation par refroidissement à sec à « cuve » rotative avec un débit de 2 à 2,5 t/min a été mis au point par Davy et testé par British Steel à Redcar [10]. Dans ce dispositif, le laitier en fusion est amené du trou de coulée au centre du « plateau » rotatif via un tuyau vertical (figure 1). Des filaments de laitier se forment en périphérie du plateau, puis des particules plus ou moins sphériques en raison de leur tension superficielle (figure 2). La teneur en verre des particules de laitier est de 99,5 %.

**Figure 1**  
Granulation à sec de LHF  
Installation pilote -  
British Steel à Redcar



**Figure 2**  
Laitiers granulés à sec  
Redcar (teneur en verre 99,5 %)

En 2007, Siemens AG a cherché à développer un procédé de granulation à sec combiné à un système de récupération de chaleur (figure 3). En réglant la distribution de l'air de refroidissement, la chaleur sortant du granulateur peut être augmentée afin d'être directement utilisée.



**Figure 3**  
Concept de granulation à sec  
avec récupération de chaleur  
intégrée [20]

- 1 - Laitier de haut-fourneau
- 2 - Alimentation en laitier
- 3 - Apport d'air de refroidissement
- 10 - Cuve de granulation fermée et refroidie à l'eau
- 11 - Cuve «rotative»
- 12 - Entraînement
- 13 - Injection d'eau (réserve)
- 14 - Lit fluidisé en cours de refroidissement
- 15 - Cuve de collecte
- 16 - Sortie d'air chaud
- 17 - Cyclone à poussière
- 18 - Echangeur de chaleur

Des procédés du même type ont été développés en Australie et en Chine [11-13]. Cependant aucun prototype n'a réellement abouti à l'échelle industrielle car la teneur en verre des laitiers était trop faible et la demande en énergie et en surface d'installation trop élevée.

Le présent article porte exclusivement sur les propriétés hydrauliques des LHF granulés à sec issus du procédé à cuve rotative, d'abord au laboratoire puis à l'échelle pilote ainsi que leurs différences comparées à des LHF granulés par voie humide.



## Installation pilote de granulation à sec

Une série de trois campagnes d'essais a été réalisée, entre 2011 et 2014, à l'aide d'une installation pilote de granulation mise en place à l'université de Leoben (Autriche) par Siemens AG [2-14-15].

Trois LHF granulés par voie humide ( $LHF_{gh}$  1 à 3) provenant de deux hauts-fourneaux de deux sites distincts ont été étudiés. Ces laitiers ont été refondus au laboratoire (en lots de 300 kg), puis granulés à sec ( $LHF_{gs}$  1 à 3) (figure 4).

La composition chimique des  $LHF_{gs}$  a été altérée au contact du revêtement réfractaire en place, lors de la fusion, celui-ci ne pouvant pas être remplacé ni adapté au type de matériau. Il a ainsi été difficile de comparer directement les caractéristiques des  $LHF_{gh}$  et  $LHF_{gs}$ .

Les  $LHF_{gs}$  générés en laboratoire ont donc été refondus en conditions réductrices dans un four Tammann (au FEhS) puis granulés à l'eau en laboratoire ( $LHF_{gh}$  lab 1 - 3) (figure 5) afin de pouvoir comparer les propriétés hydrauliques des laitiers de mêmes compositions chimiques, granulés à sec et à l'eau.



**Figure 4**  
Granulation à sec du pilote expérimental  
de l'université de Leoben



**Figure 5**  
Granulation du laitier par voie humide  
en laboratoire (FEhS)



## Analyse chimique et taux de verre

Les compositions chimiques des différentes fractions des  $LHF_{gs}$  et des  $LHF_{gh}$  correspondants sont identiques. Elles sont également homogènes pour les différentes fractions granulométriques testées : 1a (< 6,3 mm) et 1b (< 3,15 mm) comme le montre le tableau 1.



| PARAMÈTRE                      | Unité          | LHF <sub>gh</sub> 1<br>de base | LHF <sub>gs</sub> 1a<br>< 6,3 mm | LHF <sub>gs</sub> 1b<br>< 3,15 mm | LHF <sub>gh</sub> 1lab. | LHF <sub>gh</sub> 2<br>de base | LHF <sub>gs</sub> 2<br>< 6,3 mm | LHF <sub>gh</sub> 2lab. | LHF <sub>gh</sub> 3<br>de base | LHF <sub>gs</sub> 3<br>< 6,3 mm | LHF <sub>gh</sub> 3lab. |
|--------------------------------|----------------|--------------------------------|----------------------------------|-----------------------------------|-------------------------|--------------------------------|---------------------------------|-------------------------|--------------------------------|---------------------------------|-------------------------|
| SiO <sub>2</sub>               | %              | 36,2                           | 27,6                             | 27,3                              | 28,2                    | 36,2                           | 32,9                            | 33,8                    | 39,5                           | 36,9                            | 37,1                    |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> |                | 12,6                           | 35,4                             | 34,5                              | 34,5                    | 11,7                           | 22,2                            | 22,1                    | 11,6                           | 18,2                            | 18,6                    |
| FeO                            |                | 0,36                           | 1,26                             | 1,21                              | 0,4                     | 0,31                           | 1,76                            | 0,46                    | 0,48                           | 1,47                            | 0,37                    |
| TiO <sub>2</sub>               |                | 0,80                           | 0,64                             | 0,64                              | 0,63                    | 0,80                           | 0,78                            | 0,78                    | 0,52                           | 0,48                            | 0,49                    |
| MnO                            |                | 0,36                           | 0,24                             | 0,26                              | 0,25                    | 0,32                           | 0,29                            | 0,33                    | 1,27                           | 1,14                            | 1,18                    |
| CaO                            |                | 43,8                           | 29,3                             | 30,4                              | 31,0                    | 43,5                           | 37,1                            | 36,9                    | 36,7                           | 32,6                            | 32,8                    |
| MgO                            |                | 5,5                            | 3,6                              | 3,1                               | 3,6                     | 5,3                            | 4,7                             | 5,2                     | 8,7                            | 7,7                             | 8,1                     |
| Na <sub>2</sub> O              |                | 0,17                           | 0,11                             | 0,11                              | 0,15                    | 0,44                           | 0,24                            | 0,09                    | 1,23                           | 0,86                            | 0,73                    |
| K <sub>2</sub> O               |                | 0,42                           | 0,20                             | 0,17                              | 0,15                    | 0,44                           | 0,24                            | 0,09                    | 1,23                           | 0,86                            | 0,73                    |
| Na <sub>2</sub> O-Eq.          |                | 0,44                           | 0,24                             | 0,22                              | 0,21                    | 0,49                           | 0,28                            | 0,22                    | 1,10                           | 0,80                            | 0,70                    |
| S <sub>total</sub>             |                | 0,60                           | 0,10                             | 0,06                              | 0,10                    | 1,32                           | 0,01                            | 0,05                    | 0,70                           | 0,01                            | 0,03                    |
| SO <sub>3</sub>                |                | 0,13                           | 0,09                             | 0,08                              | 0,11                    | 0,14                           | 0,16                            | 0,07                    | 0,14                           | 0,07                            | 0,19                    |
| Sulfide S <sup>2-</sup>        |                | 0,60                           | 0,06                             | 0,03                              | 0,06                    | 1,27                           | 0,03                            | 0,03                    | 0,72                           | < 0,02                          | < 0,02                  |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  |                | < 0,02                         | 0,23                             | 0,20                              | 0,13                    | < 0,02                         | 0,11                            | 0,04                    | < 0,02                         | 0,05                            | 0,03                    |
| CO <sub>2</sub> lié            |                | 0,11                           | 0,05                             | 0,05                              | 0,04                    | 0,11                           | 0,08                            | 0,06                    | 0,08                           | 0,07                            | 0,06                    |
| H <sub>2</sub> O lié           |                | 0,00                           | 0,00                             | 0,03                              | 0,04                    | 0,12                           | 0,07                            | 0,05                    | 0,03                           | < 0,02                          | 0,04                    |
| Chrome                         | mg/kg          | 13                             | 12 560                           | 12 450                            | 11 173                  | 26                             | 5 713                           | 3 909                   | 32                             | 3 820                           | 2 279                   |
| CaO/SiO <sub>2</sub>           | -              | 1,21                           | 1,06                             | 1,11                              | 1,10                    | 1,20                           | 1,13                            | 1,09                    | 0,93                           | 0,88                            | 0,88                    |
| (CaO+MgO/SiO <sub>2</sub> )    |                | 1,36                           | 1,19                             | 1,25                              | 1,23                    | 1,35                           | 1,27                            | 1,25                    | 1,15                           | 1,10                            | 1,10                    |
| Test F                         |                | 1,63                           | 2,39                             | 2,42                              | 2,37                    | 1,60                           | 1,86                            | 1,81                    | 1,30                           | 1,44                            | 1,45                    |
| Taux de verre                  | %<br>en volume | 100,0                          | 89,0                             | 98,6                              | 100,0                   | 99,9                           | 98,3                            | 100,0                   | 99,8                           | 100,0                           | 100,0                   |

**Tableau 1**

Composition chimique et taux de verre des LHF<sub>gh</sub> de base, des LHF<sub>gs</sub>  
et des LHF<sub>gh</sub> de laboratoire

Les teneurs en Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, en chrome et en fer des LHF<sub>gs</sub> sont très élevées compte tenu du contact des laitiers avec le revêtement réfractaire. En revanche, les teneurs en soufre et en alcalin des LHF granulés en laboratoire sont bien inférieures à celles des LHF de base (fonte/refonte). Une telle composition chimique des LHF<sub>gs</sub> ainsi obtenue n'existe nulle part dans le monde.

Le taux de verre est très élevé dans tous les cas. Il est de 89 % pour la fraction < 6,3 mm des LHF<sub>gs</sub> 1a, et de 99 % pour

la fraction < 3,15 mm (LHF<sub>gs</sub> 1b). C'est un paramètre clé pour la réactivité hydraulique du laitier granulé. Le procédé de granulation à cuve rotative est donc capable de générer des produits à fort taux de verre (et forte réactivité). Cependant, celui de la fraction > 3,15 mm et < 6,3 mm (8 % en masse cf figure 9) reste plus modéré (mais > 89%).

Deux laitiers de haut-fourneau industriels LHF<sub>gh</sub> 1bis et LHF<sub>gh</sub> 3bis ont été caractérisés en parallèle pour comparaison. En raison des différences significatives dans la composition chimique des LHF<sub>gs</sub>, la caractérisation des LHF<sub>gh</sub> de base (1 - 3) n'a pas été poursuivie. Le LHF<sub>gh</sub> 1bis correspond aux LHF<sub>gh</sub> 1 et 2 et le LHF<sub>gh</sub> 3bis au LHF<sub>gh</sub> 3 (tableau 2).

Les figures 6 et 7 illustrent les LHF<sub>gh</sub> 1bis et LHF<sub>gh</sub> 3bis, les LHF<sub>gs</sub> 1a (< 6,3 mm), LHF<sub>gs</sub> 1b (< 3,15 mm) et LHF<sub>gs</sub> 3 (< 6,3 mm), et les LHF<sub>gh</sub> de laboratoire 1 et 3 vus au microscope à lumière réfléchie.

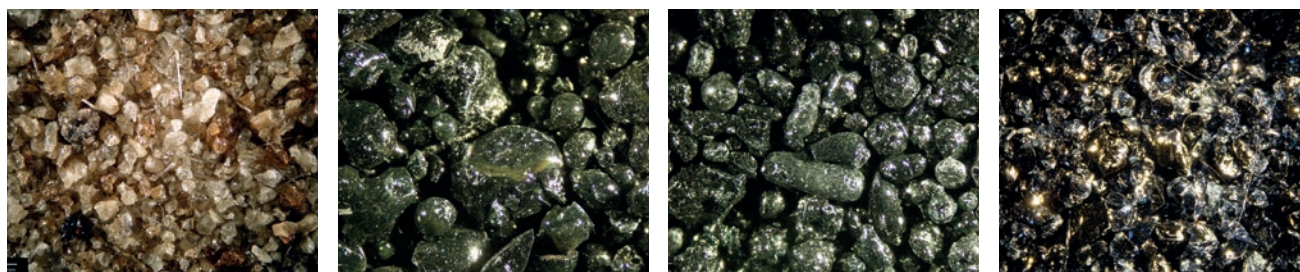
L'opacité des LHF<sub>gs</sub>, en partie verdâtre, est due à leurs teneurs élevées en fer et en chrome, et au degré d'oxydation produit lors du processus de fusion. Les taux de verre sont très élevés dans tous les cas.

Le procédé de la « cuve rotative » est donc capable de générer des taux de verre très élevés, condition préalable d'un comportement hydraulique latent. Concernant les LHF<sub>gs</sub> 1, il est à noter que la teneur en verre des particules < 6,3 mm (LHF<sub>gs</sub> 1a) est à 89 % en moyenne alors que celle des particules < 3,15 mm (LHF<sub>gs</sub> 1b) s'élève à 99 %. Cette granulométrie correspond à la granulométrie courante d'un LHF granulé à l'eau actuel. Cependant, la proportion de particules > 3,15 mm et < 6,3 mm, à très faible teneur en verre et donc à très faible réactivité, est inférieure à 8 % en masse (figure 9).

| PARAMÈTRE                      | Unité | LHF <sub>gh</sub> 1bis | LHF <sub>gh</sub> 3 bis |
|--------------------------------|-------|------------------------|-------------------------|
| SiO <sub>2</sub>               | %     | 36,7                   | 38,0                    |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> |       | 11,5                   | 12,4                    |
| FeO                            |       | 0,30                   | 0,32                    |
| TiO <sub>2</sub>               |       | 0,70                   | 0,61                    |
| MnO                            |       | 0,26                   | 1,48                    |
| CaO                            |       | 41,7                   | 33,7                    |
| MgO                            |       | 6,35                   | 11,3                    |
| Na <sub>2</sub> O              |       | 0,38                   | 0,44                    |
| K <sub>2</sub> O               |       | 0,41                   | 1,98                    |
| Na <sub>2</sub> O-Eq.          |       | 0,65                   | 1,74                    |
| S <sub>total</sub>             |       | 1,04                   | 0,63                    |
| SO <sub>3</sub>                |       | < 0,07                 | < 0,07                  |
| Sulfide S <sup>2-</sup>        |       | 0,93                   | 0,61                    |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  |       | < 0,01                 | 0,10                    |
| CO <sub>2</sub> lié            |       | 0,09                   | 0,05                    |
| H <sub>2</sub> O lié           |       | 0,13                   | 0,16                    |
| Chrome                         | mg/kg | 33                     | 30                      |
| CaO/SiO <sub>2</sub>           | -     | 1,14                   | 0,89                    |
| (CaO+MgO/SiO <sub>2</sub> )    |       | 1,31                   | 1,18                    |
| Test F                         | %     | 1,54                   | 1,32                    |
| Taux de verre                  |       | 99,9                   | 99,3                    |

**Tableau 2**

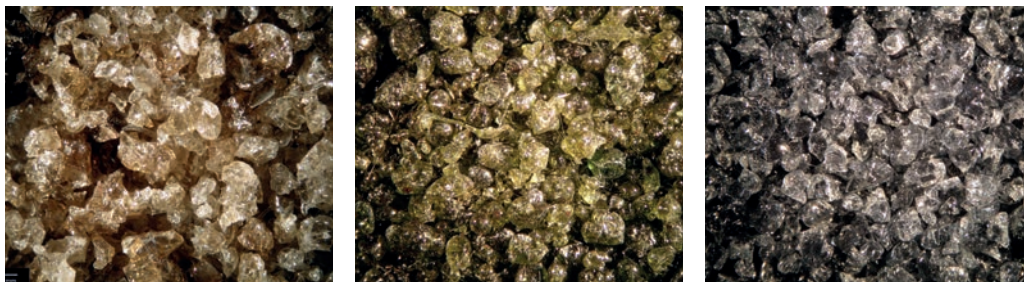
Composition chimique et taux de verre des LHF<sub>gh</sub> industriels [4].



**Figure 6**

Illustrations des LHF<sub>gh</sub> 1bis, LHF<sub>gs</sub> 1a < 6,3 mm, LHF<sub>gs</sub> 1b < 3,15 mm et LHF<sub>gh</sub> 1 de laboratoire à la loupe binoculaire ou au microscope optique à réflexion

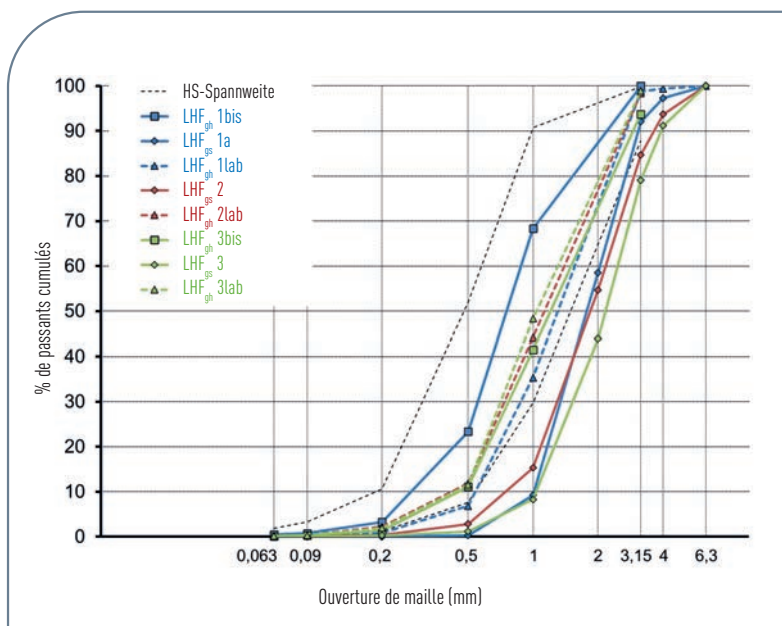
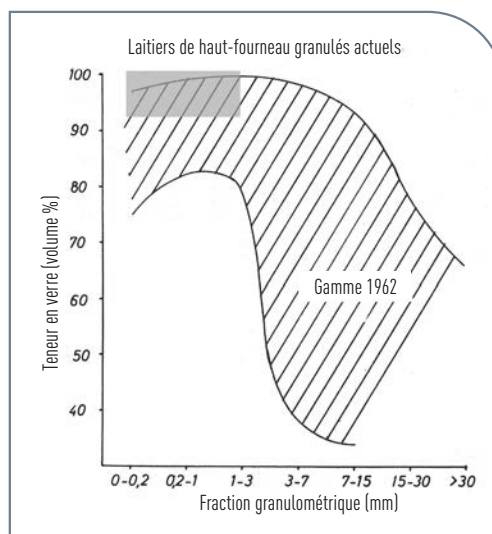
**Figure 7**  
LHF<sub>gh</sub> 3bis, LHF<sub>gs</sub> 3  
et LHF<sub>gh</sub> 3



La figure 8 illustre l'évolution du taux de verre en fonction de la fraction granulométrique pour d'anciennes productions et celles actuellement produites. Les anciennes installations de granulation étaient moins performantes et moins homogènes, produisant une fraction granulométrique grossière plus importante avec des taux de verre plus faibles. Il faut également noter qu'à cette époque, les laitiers étaient fortement basiques, ce qui les rendait davantage sujets à cristallisation.

**Figure 8**

Plage de dispersion du taux de verre  
dans les fractions granulaires  
des laitiers granulés [21]



## Analyse granulométrique

Les courbes granulométriques des différents laitiers sont représentées sur la figure 9. On remarque que la dimension des grains dépend de la géométrie de l'installation de production. Le laitier granulé en laboratoire est plus gros et le laitier industriel plus fin.

**Figure 9**

Courbes granulométriques des LHF<sub>gh</sub>  
industriels, des LHF<sub>gs</sub> et des LHF<sub>gh</sub>  
en laboratoire

## Analyse thermique de la phase vitreuse

Une analyse thermique des LHF<sub>gs</sub> 1, 2 et 3 et des LHF<sub>gh</sub> 1 lab., LHF<sub>gh</sub> 2 lab. est réalisée par calorimétrie différentielle à balayage. Faute de ne pas disposer d'échantillons de laitiers de base 1 à 3 et de LHF<sub>gh</sub> 3 lab., les résultats obtenus pour les laitiers industriels LHF<sub>gh</sub> 1bis et LHF<sub>gh</sub> 3bis sont pris en compte pour suppléer aux mesures.

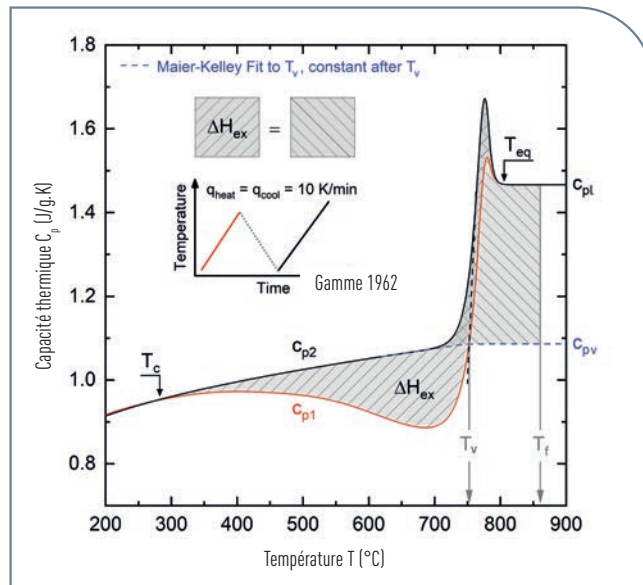
Le principe des mesures pour déterminer la température de transition vitreuse  $T_v$ , la température fictive  $T_f$  ainsi que la viscosité pour le calcul de la vitesse de refroidissement  $q$  est décrit en détail en [5-6-16].

$T_f$  est calculée à l'aide de l'équation (1). Elle est illustrée dans la figure 10.

Les capacités thermiques du laitier vitrifié sont définies lors des cycles de chauffe et de refroidissement à vitesse constante de 10 K/min. Ce processus permet d'enregistrer la mémoire thermique du verre.

$$\int_{T_r}^{T_{eq}} (C_{p2} - C_{p1}) dT = \int_{T_r}^{T_f} (C_{pl} - C_{pv}) dT \quad (1)$$

- $T_r$  = plus basse température de relaxation
- $T_f$  = température fictive
- $T_{eq}$  = température d'équilibre du laitier fondu métastable où  $C_{p1} = C_{p2}$ ,
- $C_{p1}$  = capacité thermique du premier cycle de chauffe
- $C_{p2}$  = capacité thermique du deuxième cycle de chauffe
- $T_v$  = température de transition vitreuse
- $C_{pl}$  = capacité thermique du laitier métastable fondu
- $C_{pv}$  = capacité thermique du laitier vitreux



**Figure 10**

Courbes idéales de capacité thermique d'un LHF granulé

[Concordance Maier-Kelley :

$$C_p = a + bT + cT^{-2} + dT^{-0.5}]$$

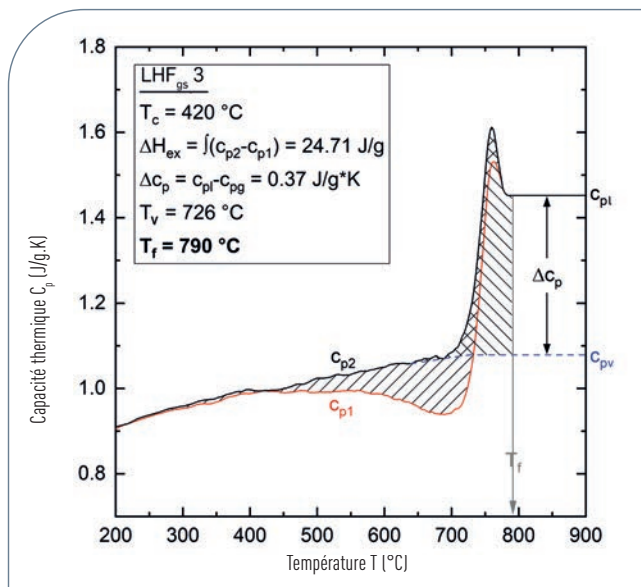
On obtient ainsi une différence notable de capacité thermique entre le premier et le second cycle de chauffe (enthalpie libre d'excès  $\Delta H_{ex}$ ), la température fictive  $T_f$  est bien supérieure à la température de transition vitreuse  $T_v$ . Si cette différence est notable, cela peut supposer que la vitesse de refroidissement est élevée et le processus de trempe efficace.

La figure 11 montre les courbes de capacité thermique mesurée dans le cas des LHF<sub>gs</sub> 3. Ces mesures ont été effectuées sur un laitier granulé non broyé, car pour un même échantillon et selon le process de broyage, les caractéristiques de la phase vitreuse peuvent être très différentes [17].

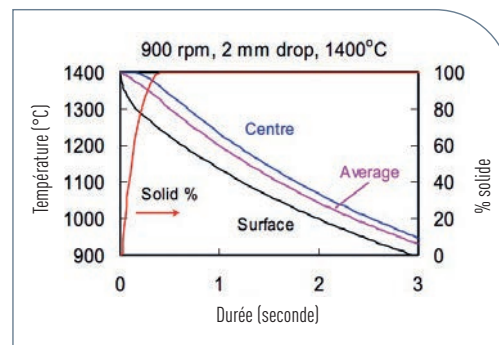
Les mesures ont été effectuées sur deux fractions de grains fins (0,355 à 0,500 mm) et grossiers (2,0 à 4,0 mm) des LHF<sub>gs</sub> non broyés.

Plus les grains sont fins, plus les valeurs de température fictive et de vitesse de refroidissement sont élevées.





**Figure 11**  
Courbes de capacité thermique.  
Cas des LHF<sub>gs</sub> 3 (2 – 4 mm)

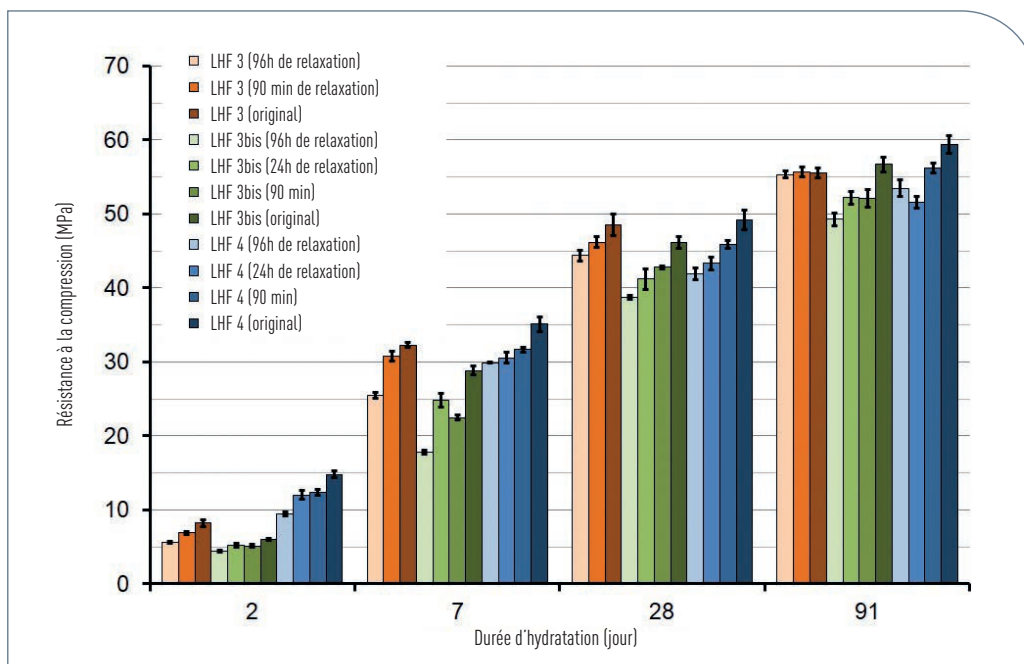


**Figure 12**  
Modèle de refroidissement à l'air  
d'une gouttelette de laitier de 2 mm  
de diamètre (à 350 °C) et distribution  
de la température dans la gouttelette.

L'analyse bibliographique montre (figure 12) qu'il existe un gradient de refroidissement au sein des grains [22].

La température fictive  $T_f$  calculée d'un grain est une valeur moyenne de l'ensemble des  $T_f$  des différentes couches vitreuses selon leur distance qui les sépare de la surface des grains. Bien que des grains de tailles différentes peuvent avoir une valeur  $T_f$  semblable à celle de la surface, la température fictive du centre du grain dépend de la distance qui le sépare de la surface, et diminue de l'extérieur vers l'intérieur. On peut donc s'attendre à ce que des grains plus grossiers aient en moyenne des vitesses de refroidissement et des valeurs  $T_f$  plus faibles.

Des études bibliographiques antérieures [5, 6, 7] ont démontré qu'en réduisant l'enthalpie par recuit (trempe) du LHF vitrifié à une température inférieure à la température fictive  $T_p$ , il existe une corrélation entre la température fictive  $T_p$ , la vitesse de refroidissement, l'enthalpie et la réactivité du LHF granulé. La résistance des mortiers de ciment à base de LHF diminue, de manière significative, en fonction de l'allongement du temps de trempe, en dépit de caractéristiques constantes pour les autres paramètres (teneur en verre, finesse, ...) (figure 13). La mémoire thermique du verre généré dans le LHF granulé vitrifié a une influence sur sa réactivité.



**Figure 13**

Influence du temps de relaxation du LHF granulé vitrifié à  $T < T_v$  sur l'évolution de la résistance des mortiers de ciment de haut-fourneau (LHF<sub>g</sub>/Clinker = 75/25).

Les caractéristiques techniques du laitier à l'état vitreux sont rassemblées dans le tableau 3.

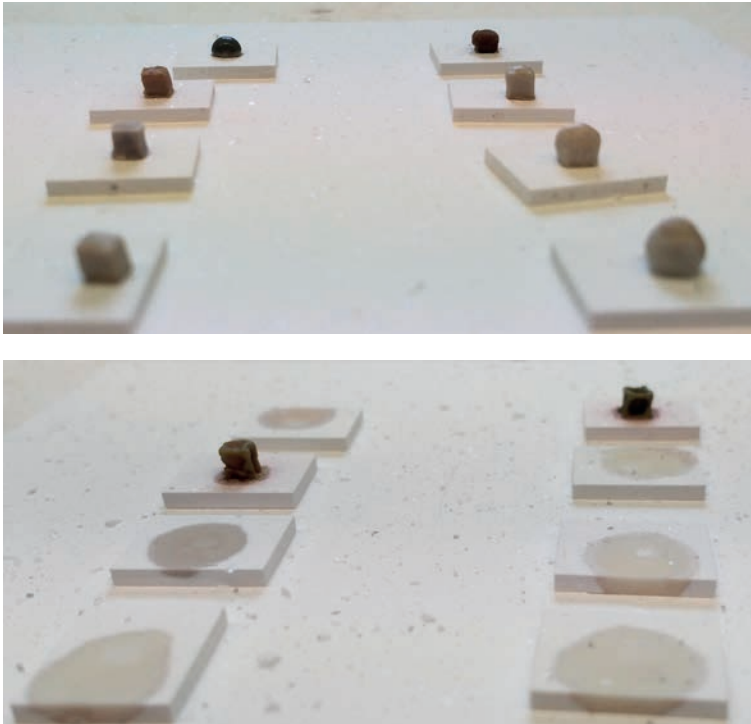
Seule la fraction inférieure (0,355 à 0,500 mm) est analysée dans ce cas.

On constate que les LHF granulés à l'eau (de laboratoire et industriels) présentent des températures fictives et des vitesses de refroidissement nettement plus élevées que les LHF granulés à sec, ce qui leur procure une enthalpie plus élevée. Cela se traduit également par des valeurs plus élevées de l'enthalpie excédentaire  $\Delta H_{ex}$ . Elle correspond à l'excès d'enthalpie généré au cours du processus de trempe avec une vitesse de refroidissement élevée inconnue comparé à un système de refroidissement de conditions maîtrisées (avec une vitesse de refroidissement de 10 K/min).

|                                                                        | $T_v$ (°C) | $T_f$ (°C) | Vitesse de refroidissement (K/s) | $\Delta H_{ex}$ (J/g) |
|------------------------------------------------------------------------|------------|------------|----------------------------------|-----------------------|
| LHF <sub>gh</sub> 1bis (similaire au LHF <sub>gh</sub> 1 et 2 de base) | 741        | 820        | $5,9 \cdot 10^3$                 | 35,7                  |
| LHF <sub>gs</sub> 1                                                    | 776        | 846        | $5,1 \cdot 10^3$                 | 25,3                  |
| LHF <sub>gh</sub> 1lab                                                 | 783        | 915        | $1,4 \cdot 10^6$                 | 47,2                  |
| LHF <sub>gs</sub> 2                                                    | 756        | 811        | $6,2 \cdot 10^2$                 | 21,4                  |
| LHF <sub>gh</sub> 2lab                                                 | 768        | 867        | $6,7 \cdot 10^4$                 | 39,2                  |
| LHF <sub>gh</sub> 3bis (similaire au LHF <sub>gh</sub> 3 de base)      | 720        | 825        | $6,3 \cdot 10^4$                 | 45,1                  |
| LHF <sub>gs</sub> 3                                                    | 726        | 790        | $1,2 \cdot 10^3$                 | 24,7                  |

**Tableau 3**

Caractéristiques techniques des LHF granulés (à l'état vitreux) - Fraction 0,355 à 0,500 mm



**Figure 14**  
LHF<sub>gh</sub> industriels, LHF<sub>gs</sub> 1 et LHF<sub>gh</sub> 1 lab.  
après fusion à 1400°C (haut) et 1500°C (bas)

Les compositions chimiques très différentes des LHF granulés à sec et des LHF granulés à l'eau conduisent à des valeurs de température de transition vitreuse  $T_v$  ainsi que des comportements lors de la fusion très différents.

La figure 14 montre qu'à 1500 °C, tous les laitiers granulés industriels, quelle que soit leur composition chimique, ont fondu, alors que le LHF<sub>gs</sub> 1 et le LHF<sub>gh</sub> 1 lab. ne l'ont pas été.

Ces analyses indiquent que les propriétés (par exemple viscosité) des laitiers liquides issus de l'installation pilote peuvent différer significativement de celles des laitiers de base.

### Propriétés hydrauliques

Afin de pouvoir évaluer les propriétés hydrauliques des LHF granulés à sec et des laitiers granulés à l'eau, ceux-ci sont d'abord broyés à l'aide d'un broyeur à boulet par lots de 10 kg à environ 4200 cm<sup>2</sup>/g (valeur Blaine) (Tableau 4).

Pour mettre en évidence l'influence de la nature du laitier sur ses propriétés hydrauliques, des ciments de haut-fourneau CEM III/B contenant 75 % de LHF<sub>gh</sub> et 25 % de clinker ont été étudiés (cf. base de données du FEHS pour les LHF).

Pour la production de ciment au laboratoire, on veille à ce que la distribution granulométrique du clinker soit constante après broyage (tableau 5). La teneur en SO<sub>3</sub> des ciments est de 4,5 % en masse et a été ajustée en ajoutant de l'anhydrite et du gypse. La résistance mécanique est déterminée conformément à la norme EN 196-1 (échantillon de mortier 40 mm x 40 mm x 160 mm, E/C = 0,50).

La chaleur d'hydratation a été définie à 7 jours selon la norme EN 196-11 (pâte de ciment, E/C = 0,50) par calorimétrie à conduction isothermique.

|                         | Valeur<br>Blaine<br>(cm <sup>2</sup> /g) | $d_{50}$<br>( $\mu$ m) | $d'_{RRSB}$<br>( $\mu$ m) | $n_{RRSB}$<br>(-) <sup>(1)</sup> |
|-------------------------|------------------------------------------|------------------------|---------------------------|----------------------------------|
| LHF <sub>gh</sub> 1bis  | 4 220                                    | 10                     | 15                        | 0,90                             |
| LHF <sub>gs</sub> 1a    | 4 410                                    | 11                     | 17                        | 0,89                             |
| LHF <sub>gh</sub> 1lab. | 4 410                                    | 11                     | 16                        | 1,02                             |
| LHF <sub>gs</sub> 2     | 4 490                                    | 11                     | 17                        | 0,83                             |
| LHF <sub>gh</sub> 2lab. | 4 340                                    | 12                     | 18                        | 0,97                             |
| LHF <sub>gh</sub> 3bis  | 4 200                                    | 11                     | 15                        | 1,00                             |
| LHF <sub>gs</sub> 3     | 4 420                                    | 11                     | 17                        | 0,91                             |
| LHF <sub>gh</sub> 3lab. | 4 290                                    | 11                     | 17                        | 0,91                             |

**Tableau 4**  
Finesse des LHF granulés par voie humide  
et des LHF<sub>gs</sub> broyés

1 - La loi de Rosin-Rammler-Sperling-Bennet (RRSB) permet de définir la qualité de la finesse de mouture.  
n donne une image de l'étalement de la granulométrie. d' est la maille de refus.

|                   | Unité              | 6                                                                                              | 7                                             | 12                     | 13                     | 14                                                                                                                                           |
|-------------------|--------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|------------------------|------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                   |                    | LHF <sub>gs</sub> 1<br>LHF <sub>gs</sub> 2<br>LHF <sub>gh</sub> 1lab<br>LHF <sub>gh</sub> 2lab | LHF <sub>gs</sub> 3<br>LHF <sub>gh</sub> 3lab | LHF <sub>gh</sub> 1bis | LHF <sub>gh</sub> 3bis | LHF <sub>gs</sub> 1a<br>LHF <sub>gs</sub> 1b<br>LHF <sub>gs</sub> 1c<br>LHF <sub>gs</sub> 2a<br>LHF <sub>gs</sub> 3a<br>LHF <sub>gs</sub> 3b |
| Valeur de Blaine  | cm <sup>2</sup> /g | 4 210                                                                                          | 4 250                                         | 4 210                  | 4 200                  | 4 250                                                                                                                                        |
| d <sub>50</sub>   | µm                 | 11                                                                                             | 11                                            | 10                     | 10                     | 10                                                                                                                                           |
| d'RRSB            | µm                 | 16                                                                                             | 16                                            | 14                     | 14                     | 14                                                                                                                                           |
| η <sub>RRSB</sub> | -                  | 0,96                                                                                           | 0,94                                          | 0,96                   | 0,93                   | 0,95                                                                                                                                         |

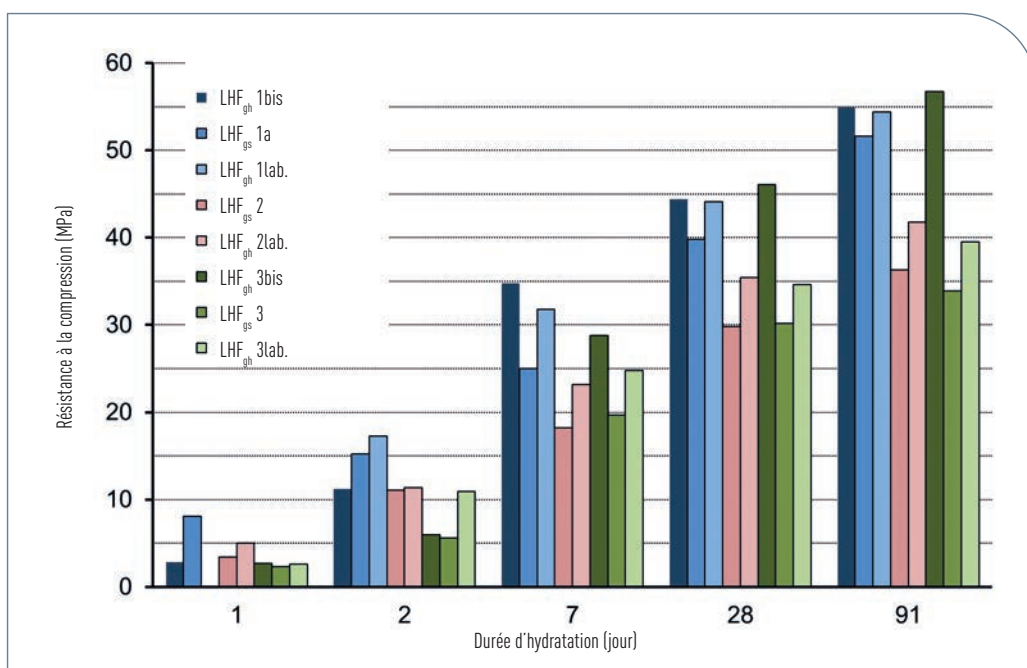
**Tableau 5**

Valeurs caractéristiques de finesse des différents lots de clinker broyé

Les résultats d'essais sur mortier sont présentés sur la figure 15. Dans les trois cas étudiés, la résistance des ciments aux LHF<sub>gs</sub> est inférieure à celle des ciments aux LHF<sub>gh</sub> de laboratoire.

La résistance des ciments aux LHF<sub>gs</sub> 1a et de ceux aux LHF<sub>gh</sub> 1 lab. est élevée. La

teneur en Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, de 35 % dans les deux cas, joue un rôle déterminant ! En revanche, la résistance des ciments aux LHF<sub>gs</sub> 2 et de ceux aux LHF<sub>gh</sub> 2 lab. sont nettement plus faibles. Pour ces deux cas, la teneur en Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> n'est « que » de 22 %, alors que les LHF<sub>gh</sub> de base 1 et 2 sont finalement peu différents.



**Figure 15**

Evolution de la résistance des ciments de haut-fourneau (LHF<sub>g</sub>/Clinker = 75/25)



L'influence de la nature du réfractaire fausse les résultats mais cela diminue en fonction du temps ; c'est pourquoi, cela est plus frappant pour les LHF<sub>gh</sub> 1 et 2 que pour le LHF<sub>gh</sub> 3.

La composition chimique des LHF<sub>gs</sub> 3 et LHF<sub>gh</sub> 3 lab. et des LHF<sub>gs</sub> 2 et LHF<sub>gh</sub> 2 lab. sont quasi similaires, en conséquence, la résistance des ciments aux laitiers correspondant sont également similaires à partir de 7 jours d'hydratation.

Les résistances à 28 et 91 jours des ciments à base de LHF<sub>gh</sub> 1bis et LHF<sub>gh</sub> 3bis sont représentées en figure 15. Celles-ci sont proches malgré des compositions chimiques différentes.

Les évolutions de la chaleur d'hydratation des ciments de haut-fourneau sont présentées sur les figures 16 et 17.

En comparant les courbes des deux figures, on remarque l'influence considérable de la composition chimique et donc par conséquent sur la réactivité des LHF<sub>gs</sub> et des LHF<sub>gh</sub> de laboratoire comparés aux laitiers industriels.

Les ciments de haut-fourneau (aux laitiers industriels) présentent une courbe typique de flux thermique avec un pic correspondant au clinker à 12 h, à 44 h pour le laitier granulé (LHF<sub>gh</sub> 1bis) et à 52 h pour LHF<sub>gh</sub> 3bis (figure 17).

En revanche, les ciments aux LHF<sub>gs</sub> ou à base de LHF<sub>gh</sub> de laboratoire, ont une réaction précoce et un dégagement de chaleur plus élevé. Outre la basicité, la teneur en  $Al_2O_3$  de ces échantillons joue un rôle important.

Si l'on compare le flux thermique des ciments de haut-fourneau à base de LHF<sub>gs</sub> à ceux de LHF<sub>gh</sub> de laboratoire, présentant des caractéristiques chimiques quasi identiques (figure 16) on constate que la granulation par voie humide produit des dégagements de chaleur plus précoces et plus élevés que la granulation à sec.

Les résistances mécaniques des LHF<sub>gs</sub> sont inférieures à celles des LHF<sub>gh</sub> de laboratoire (tableau 3). Elles dépendent des températures fictives et de l'enthalpie. La finesse de mouture (laitier, clinker) ainsi que la teneur moyenne en verre (plus faible des LHF<sub>gs</sub>) n'ont pas vraiment d'influence sur les résultats.

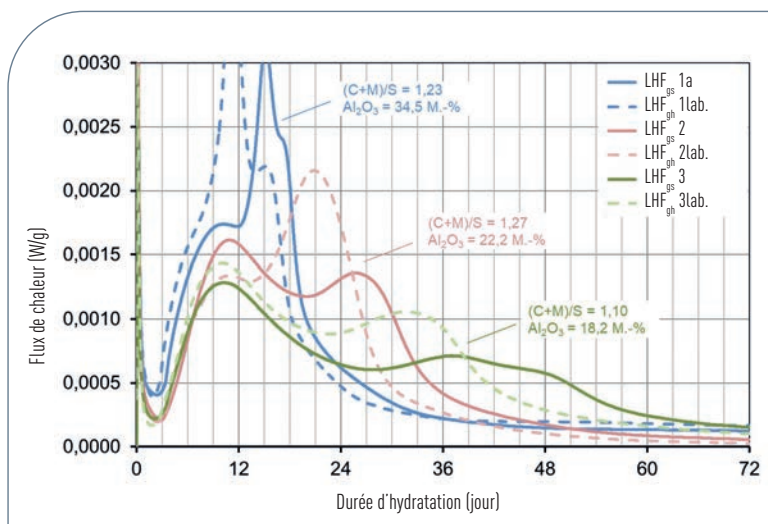


Figure 16

Evolution de la chaleur d'hydratation des ciments de haut-fourneau  
(LHF<sub>gh</sub>/Clinker = 75/25)

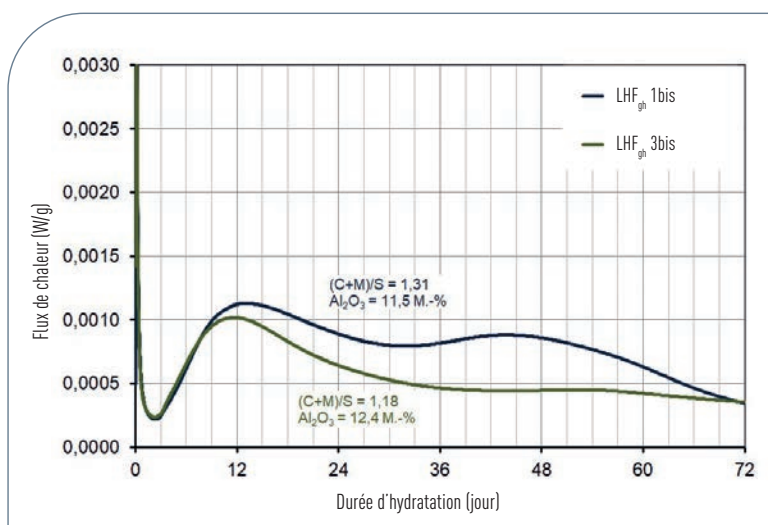


Figure 17

Chaleur d'hydratation des ciments de haut-fourneau  
(LHF<sub>gh</sub>/Clinker = 75/25)

## Installation industrielle pilote de granulation à sec

La deuxième partie de l'étude a été consacrée aux essais industriels réalisés au sein du site VoestAlpine de Linz (figure 18), où une unité pilote basée sur les recherches en laboratoire a été conçue et construite sur le haut-fourneau A, en collaboration avec Siemens et l'Université de Leoben.

Du point de vue de la caractérisation des propriétés hydrauliques, l'usine de démonstration offre le grand avantage que le laitier de haut-fourneau produit en exploitation est refroidi et qu'il peut ainsi également servir de référence ( $LHF_{gh}$  3bis).

Cependant, alors que les essais de l'installation technique ont permis de disposer de  $LHF_{gs}$  purs pour les analyses de matériaux, lors du démarrage de l'installation industrielle pilote, le LHF granulé par voie humide conventionnelle constituait le lit fluidisé de base sous le plateau rotatif (figure 3).



**Figure 18**

Usine de démonstration de granulation à sec chez Voestalpine à Linz [23].

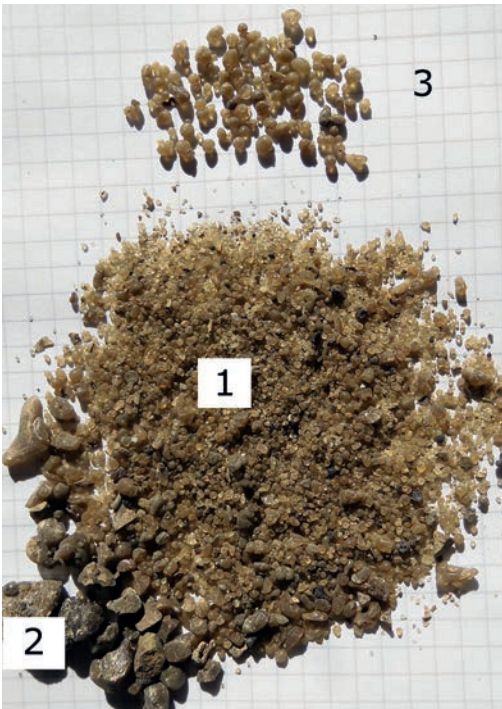
Ceci est également lié à des durées généralement très courtes de fonctionnement de l'installation pilote. Les laitiers ainsi obtenus contiennent un mélange de LHF granulés conventionnels (à l'eau), de LHF<sub>gs</sub> fraîchement produits et de composés cristallins ou des agglomérats (figure 19).

Afin de pouvoir étudier les propriétés des LHF<sub>gs</sub> « purs » générés, il a donc été nécessaire de préparer les grains manuellement via un tamisage > 4 mm (séparation des agglomérats et des gros composés cristallins) et par une séparation par « roulage » des LHF<sub>gs</sub> des LHF<sub>gh</sub>) [3].

Figure 19

Mélange 1 (tamis 5 mm)

- 1 - Mélange de LHF<sub>gh</sub>, LHF<sub>gs</sub> et fractions cristallines
- 2 - Isolation des fractions cristallines grossières ainsi que des agglomérats
- 3 - LHF<sub>gs</sub> séparés



|                   |                                    | Unité      | Echantillon 1 | Echantillon 2 | Echantillon 3 |
|-------------------|------------------------------------|------------|---------------|---------------|---------------|
| > 4 mm            | Fraction cristalline / Agglomérats |            | 22            | 22            | 14            |
| < 4 mm            | LHF <sub>gh</sub>                  |            | 40            | 51            | 49            |
|                   | LHF <sub>gs</sub>                  |            | 38            | 27            | 37            |
| LHF <sub>gs</sub> | 0,2 à 0,5 mm                       | % en masse | 0,6           | 21,2          | 25,7          |
|                   | 0,5 à 1,0 mm                       |            | 18,7          |               |               |
|                   | 1,0 à 2,0 mm                       |            | -             | -             | 51,4          |
|                   | 1,0 à 3,15 mm                      |            | 80,7          | 78,8          | -             |
|                   | 2,0 à 3,15 mm                      |            | -             | -             | 22,9          |

Les composants cristallins ont été formés, notamment, à partir de laitiers qui ont échappé à la « cuve rotative » et ont glissé directement dans le lit fluidisé. Les agglomérats ont pu se former à partir de LHF<sub>gs</sub> produits précédemment. De toute évidence, ces particules ont eu la possibilité de s'agglomérer à chaud, en raison d'un mouvement insuffisant du lit fluidisé.

Après séparation des LHF<sub>gs</sub> du mélange des trois lots issus des campagnes, plusieurs fractions granulométriques ont été individualisées (tableau 6). Les LHF<sub>gs</sub> représentent entre 27 et 38 % en masse des mélanges. D'autre part, les fractions massiques (tableau 6) montrent que les LHF<sub>gs</sub> issus du démonstrateur sont plus grossiers que le LHF<sub>gh</sub> 1 bis (figure 9).

Tableau 6

Proportions des différents composants  
des mélanges issus des essais  
du démonstrateur

## Analyse chimique et taux de verre

La composition chimique et le taux de verre des mélanges ainsi que ceux des LHF<sub>gs</sub> isolés sont présentés dans le tableau 7.

Le LHF<sub>gh</sub> 3bis (Tableau 2) sert de référence.

| PARAMÈTRE                      | Unité       | Mélange échantillon 1 | LHF <sub>gs</sub> 1   |                       | Mélange échantillon 2 | LHF <sub>gs</sub> 2   |                       | Mélange échantillon 3 | LHF <sub>gs</sub> 3   |                       | LHF <sub>gh</sub> 3bis |
|--------------------------------|-------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|------------------------|
|                                |             |                       | LHF <sub>gs</sub> 1-1 | LHF <sub>gs</sub> 1-2 |                       | LHF <sub>gs</sub> 2-1 | LHF <sub>gs</sub> 2-2 |                       | LHF <sub>gs</sub> 3-1 | LHF <sub>gs</sub> 3-2 |                        |
| Fraction                       | mm          |                       | 1,0 à 3,15            | 0,5 à 1,0             |                       | 1,0 à 3,15            | < 1,0                 |                       | < 1,0                 | > 2,0                 |                        |
| SiO <sub>2</sub>               | %           | 38,2                  | 36,9                  | 36,9                  | 37,8                  | 37,6                  | 37,6                  | 37,6                  | -                     | 38,5                  | 38,0                   |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> |             | 12,3                  | 12,0                  | 12,0                  | 10,5                  | 10,7                  | 10,7                  | 11,1                  | -                     | 11,0                  | 12,4                   |
| FeO                            |             | 0,34                  | 0,26                  | 0,32                  | 0,13                  | 0,31                  | 0,31                  | 0,41                  | -                     | 0,35                  | 0,32                   |
| TiO <sub>2</sub>               |             | 0,58                  | 0,57                  | 0,58                  | 0,50                  | 0,50                  | 0,50                  | 0,52                  | -                     | 0,51                  | 0,61                   |
| MnO                            |             | 1,31                  | 1,29                  | 1,28                  | 1,04                  | 1,13                  | 1,13                  | 1,34                  | -                     | 1,29                  | 1,48                   |
| CaO                            |             | 34,0                  | 34,5                  | 34,5                  | 35,5                  | 36,0                  | 36,1                  | 35,0                  | -                     | 35,2                  | 33,7                   |
| MgO                            |             | 10,9                  | 11,1                  | 11,2                  | 10,0                  | 10,3                  | 10,4                  | 10,5                  | -                     | 10,2                  | 11,3                   |
| Na <sub>2</sub> O              |             | 0,41                  | 0,40                  | 0,40                  | 0,39                  | 0,39                  | 0,40                  | 0,38                  | -                     | 0,34                  | 0,44                   |
| K <sub>2</sub> O               |             | 1,52                  | 1,25                  | 1,3                   | 1,21                  | 1,25                  | 1,27                  | 1,16                  | -                     | 1,15                  | 1,98                   |
| Na <sub>2</sub> O-Eq.          |             | 1,41                  | 1,22                  | 1,26                  | 1,19                  | 1,25                  | 1,27                  | 1,14                  | -                     | 1,10                  | 1,74                   |
| S <sub>total</sub>             |             | 0,70                  | -                     | -                     | 0,80                  | -                     | -                     | -                     | -                     | -                     | 0,63                   |
| SO <sub>3</sub>                |             | 0,07                  | -                     | -                     | 0,17                  | -                     | -                     | < 0,02                | -                     | 0,13                  | < 0,07                 |
| Sulfide S <sup>2-</sup>        |             | 0,64                  | -                     | -                     | 0,77                  | -                     | -                     | 0,97                  | -                     | 0,89                  | 0,61                   |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  |             | < 0,02                | < 0,02                | < 0,02                | < 0,02                | < 0,02                | < 0,02                | < 0,02                | -                     | < 0,02                | 0,10                   |
| CO <sub>2</sub> lié            |             | 0,06                  | -                     | -                     | 0,09                  | -                     | -                     | 0,09                  | -                     | 0,08                  | 0,05                   |
| H <sub>2</sub> O lié           |             | 0,11                  | -                     | -                     | 0,08                  | -                     | -                     | 0,04                  | -                     | 0,05                  | 0,16                   |
| CaO/SiO <sub>2</sub>           | -           | 0,89                  | 0,93                  | 0,93                  | 0,94                  | 0,95                  | 0,96                  | 0,93                  | -                     | 0,91                  | 0,89                   |
| (CaO+MgO/SiO <sub>2</sub> )    |             | 1,18                  | 1,24                  | 1,24                  | 1,21                  | 1,28                  | 1,24                  | 1,21                  | -                     | 1,18                  | 1,18                   |
| Test F                         |             | 1,32                  | -                     | -                     | 1,33                  | -                     | -                     | 1,33                  | -                     | 1,30                  | 1,32                   |
| Taux de verre                  | % en volume | 97,5                  | 98,4                  | 99,1                  | 98,9                  | 99,5                  | 99,7                  | 99,5                  | 99,7                  | 99,7                  | 99,3                   |

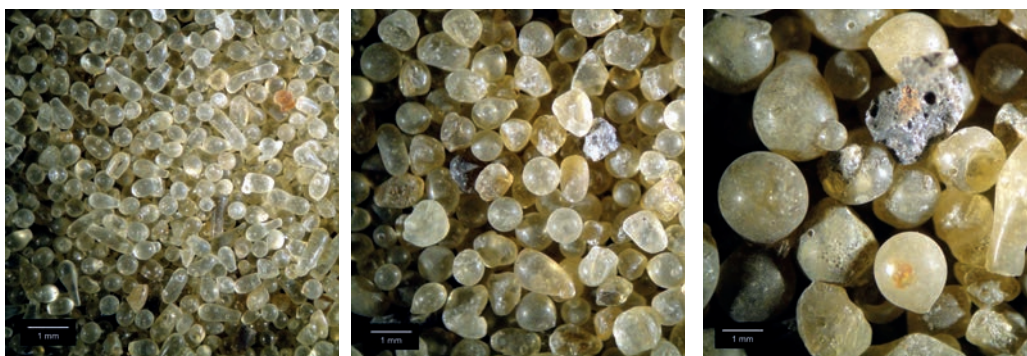
**Tableau 7**

Composition chimique et taux de verre des LHF<sub>gs</sub> issus des tests du démonstrateur



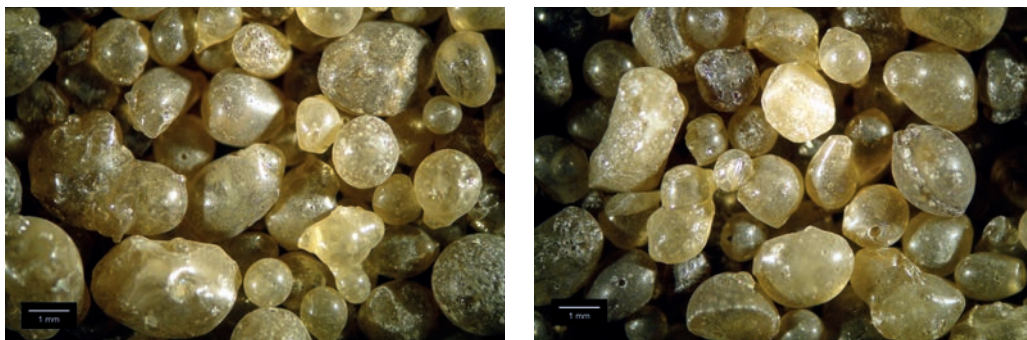
La composition chimique des différents échantillons de laitiers et des différentes fractions de  $LHF_{gs}$  est homogène compte tenu du fait que le process du HF est très stable ; la variabilité dans les compositions chimiques observée représente la variabilité classique du process industriel. Les figures 20, 21 et 22 illustrent parfaitement la forme

sphériques des particules vitrifiées de  $LHF_{gs}$ . Les images à la loupe binoculaire des différentes fractions triées confirment la bonne homogénéité entre les différentes particules et les différentes fractions. Là aussi, des teneurs élevées en verre sont obtenues malgré des laitiers de faible basicité ( $CaO/SiO_2 = 0,89$  à  $0,96$ ).



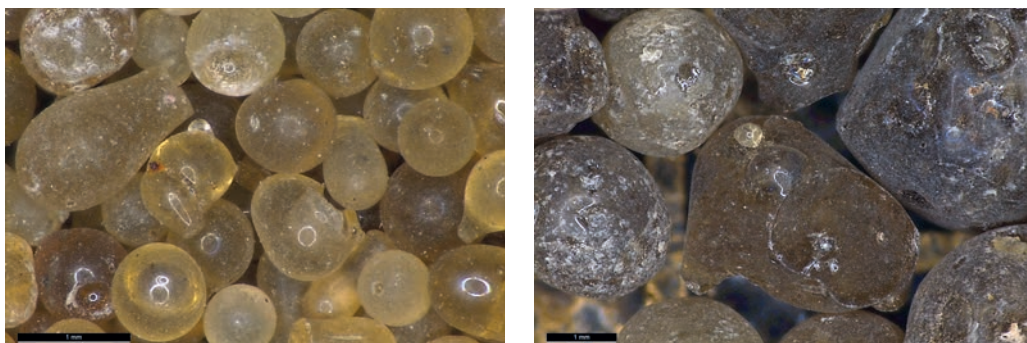
**Figure 20**

$LHF_{gs}$  du mélange 1 (à gauche 0,2 à 0,5 mm, au centre 0,5 à 1,0 mm, à droite 1,0 à 3,15 mm)



**Figure 21**

$LHF_{gs}$  du mélange échantillon 2 (à gauche < 1,0 mm, à droite 1,0 à 3,15 mm)

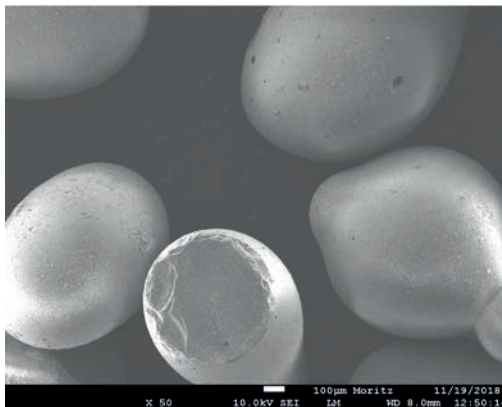


**Figure 22**

$LHF_{gs}$  du mélange 3 (à gauche < 1,0 mm, à droite > 2,0 mm)

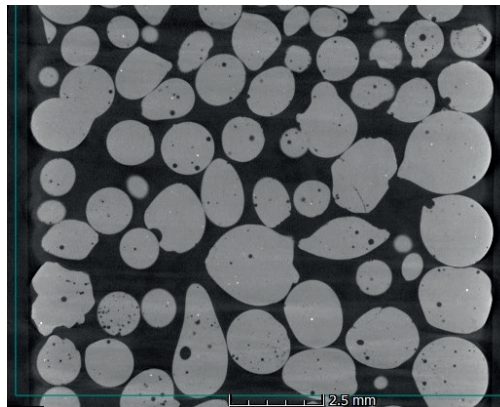


Les images au MEB couplé à la tomодensitométrie (CT 3D) montrent que les particules de LHF<sub>gs</sub> ne sont en général pas poreuses, contrairement à la plupart des LHF granulés (figures 23 et 24).



**Figure 23**

Image MEB de LHF<sub>gs</sub> <1,0 mm issus du mélange 3

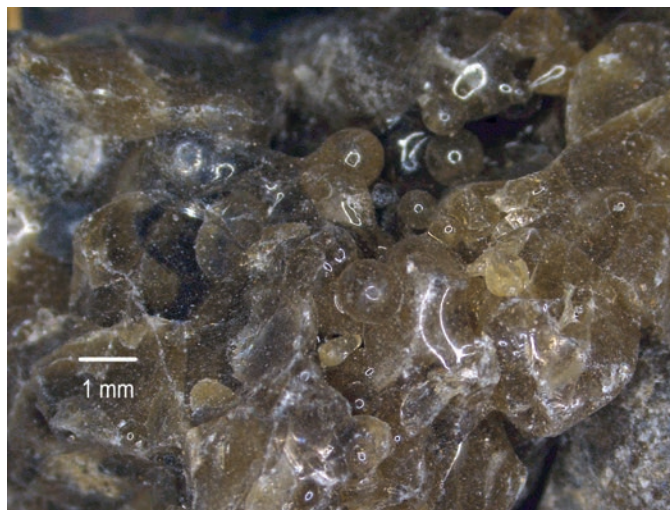


**Figure 24**

Image 3D CT de LHF<sub>gs</sub> de 1,0 à 2,0 mm issus du mélange 3

La forme des particules de LHF<sub>gs</sub> et leur siccité risquent cependant de poser un problème lors de la gestion des flux, notamment en ce qui concerne le stockage, le transport et le broyage.

La figure 25 montre un exemple d'agglomérats, à forte teneurs en verre, provenant de LHF<sub>gs</sub> et obtenus en dessous de la température de transition vitreuse  $T_v$  (environ 722°C, tableau 8).



**Figure 25**

Agglomérats et LHF<sub>gs</sub> issus du mélange 3

## Propriétés de la phase vitreuse

Les analyses par calorimétrie différentielle à balayage (DSC) des LHF<sub>gs</sub> non broyés issus du démonstrateur ont également été effectuées à l'université de technologie de Clausthal. Les résultats sont présentés dans le tableau 8. Les grains sont classés en différentes catégories en fonction de leur granulométrie : « petits » de 0,355 à 0,500 mm, « moyens » de 0,5 à 1,0 mm et « grossiers » de 2,0 à 4,0 mm.

|                                         | Catégorie | T <sub>v</sub> (°C) | T <sub>i</sub> (°C) | Vitesse de refroidissement (K/s) | ΔH <sub>ex</sub> (J/g) |
|-----------------------------------------|-----------|---------------------|---------------------|----------------------------------|------------------------|
| LHF <sub>gh</sub> 3bis                  | p         | 720                 | 825                 | 6,3 x 10 <sup>4</sup>            | 45,1                   |
|                                         | g         |                     | 796                 | 4,2 x 10 <sup>3</sup>            | 32,6                   |
| LHF <sub>gs</sub> 1a<br>(1,0 à 3,15 mm) | g         | 723                 | 787                 | 592                              | 27,4                   |
| LHF <sub>gs</sub> 1b<br>(0,5 à 1,0 mm)  | m         | 721                 | 804                 | 3,2 x 10 <sup>3</sup>            | 37,3                   |
| LHF <sub>gs</sub> 2a<br>(1,0 à 3,15 mm) | g         | 722                 | 787                 | 592                              | 27,1                   |
| LHF <sub>gs</sub> 2b<br>(< 1,0 mm)      | p + m     | 723                 | 795                 | 1,3 x 10 <sup>3</sup>            | 32,2                   |
|                                         | p         | 721                 | 801                 | 2,4 x 10 <sup>3</sup>            | 34,8                   |
| LHF <sub>gs</sub> 3a<br>(< 1,0 mm)      | p         | 722                 | 779                 | 252                              | 25,3                   |
|                                         | p + m     | 721                 | 767                 | 64                               | 20,2                   |
| LHF <sub>gs</sub> 3b<br>(> 2,0 mm)      | g         | 721                 | 775                 | 161                              | 23,9                   |
|                                         | g         | 722                 | 767                 | 64                               | 20,0                   |

Catégorie d'analyse DSC : p (petit) = 0,355 à 0,500 mm - m (moyen) = 0,5 à 1,0 mm - g (grossier) = 2,0 à 4,0 mm

**Tableau 8**  
Propriétés de la phase vitreuse du  
LHF<sub>gh</sub> 3bis et des LHF<sub>gs</sub> issus du démonstrateur

Pour les LHF<sub>gs</sub> 3b, les plus grossiers (> 2,0 mm), la mesure a été effectuée deux fois car des valeurs différentes de température fictive, de taux de refroidissement et d'enthalpie de mélange ont été obtenues. Les particules > 2,0 mm ont dû être partiellement réduites afin de pouvoir les insérer dans les petits creusets en platine des appareils de mesure DSC (figure 26).

La répartition aléatoire des morceaux de particules issus à la fois de la surface et du cœur des grains de LHF<sub>gs</sub> a conduit à des variations de mesures compte tenu de leurs proportions différentes dans les deux prises d'essai.

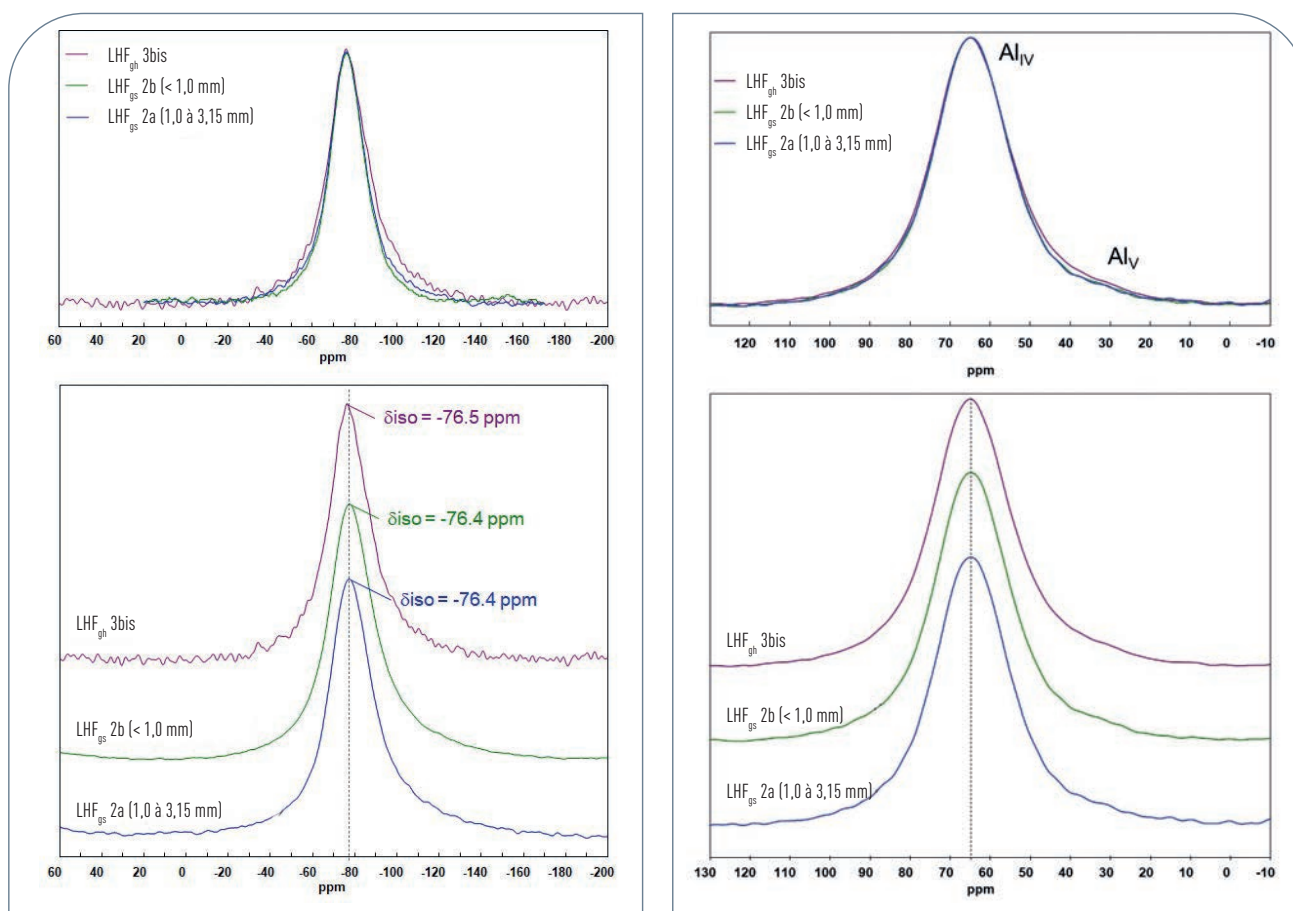
La température de transition vitreuse T<sub>v</sub> est presque identique pour tous les échantillons en raison de leur composition chimique très similaire.

Les valeurs de température fictive T<sub>i</sub> et de vitesses de refroidissement des LHF<sub>gs</sub> et leur enthalpie d'excès sont significativement plus basses que celles des LHF granulés conventionnels (LHF<sub>gh</sub> 3bis). Ces différences sont encore plus marquées pour les plus petites particules.

Des analyses par spectrométrie à résonance magnétique nucléaire par rotation à l'angle magique (MAS-RMN) du LHF granulé industriel 13b des LHF<sub>gs</sub> 2-1 et 2-2 ainsi que 3-1 et 3-2 ont été réalisées au CEMHTI d'Orléans. L'influence du processus de refroidissement ou de la taille du grain sur la l'environnement atomique du <sup>29</sup>Si ou de <sup>27</sup>Al dans la matrice vitreuse n'a pas pu être démontrée (figure 27).



**Figure 26**  
Creuset porte-échantillon de l'appareil  
de mesure DSC



**Figure 27**

Courbes MAS- RMN  $^{29}\text{Si}$ - (à gauche) et  $^{27}\text{Al}$ - (à droite) pour le laitier de haut-fourneau granulé industriel LHF<sub>gh</sub> 3bis et les LHF<sub>gs</sub> 2a (1,0 à 3,15 mm) et 2b (<1,0mm)

Cela dépend plutôt de la composition chimique du LHF granulé.

Le nombre d'oxygènes voisins de liaison est caractéristique de l'environnement atomique du Si. Les Si avec  $n = 0$  à 4 oxygènes sont appelés  $\text{Q}^n$ .

Le LHF granulé broyé présente généralement une forte proportion de groupes  $\text{Q}^1$  et  $\text{Q}^2$ . Cela signifie qu'aucun réseau continu de silicates ( $\text{Q}^4$ ) ne se forme dans la phase vitreuse des laitiers. La proportion des groupes  $\text{Q}^1$  et  $\text{Q}^2$  augmente avec la basicité du laitier de haut-fourneau.  $\text{Al}^{3+}$  est principalement coordonné de manière tétraédrique (= formation de réseaux). Les résultats des analyses par RMN sont conformes aux observations d'études antérieures [18].

## Propriétés hydrauliques

Les finesses de mouture des LHF<sub>gs</sub> broyés et des LHF<sub>gh</sub> 3bis sont présentées dans le tableau 9. Compte tenu des faibles quantités des différentes fractions de LHF<sub>gs</sub>, une préparation préalable a été effectuée dans un broyeur à vibrations au lieu d'un broyeur à billes de 10 kg. Par conséquent, les poudres ainsi obtenues étaient un peu plus grossières que le LHF<sub>gh</sub> broyé industriel 3bis. En revanche, le clinker utilisé pour les ciments à base de LHF<sub>gs</sub> présente une finesse identique à celle utilisée précédemment pour les formulations à base de LHF<sub>gh</sub> 3bis (tableau 5).

|                                      | Valeur Blaine (cm <sup>2</sup> /g) | d <sub>50</sub> (μm) | d'RRSB (μm) | n <sub>RRSB</sub> (-) | < 6 μm (% de masse) |
|--------------------------------------|------------------------------------|----------------------|-------------|-----------------------|---------------------|
| LHF <sub>gh</sub> 3bis               | 4 200                              | 1                    | 15          | 1,00                  | 32                  |
| LHF <sub>gs</sub> 1a (1,0 à 3,15 mm) | 4 020                              | 11                   | 17          | 0,94                  | 32                  |
| LHF <sub>gs</sub> 1b (0,5 à 1,0 mm)  | 3 790                              | 12                   | 17          | 0,95                  | 31                  |
| LHF <sub>gs</sub> 2a (1,0 à 3,15 mm) | 4 310                              | 12                   | 17          | 1,03                  | 28                  |
| LHF <sub>gs</sub> 2b (< 1,0 mm)      | 4 150                              | 13                   | 19          | 1,01                  | 27                  |
| LHF <sub>gs</sub> 3a (< 1,0 mm)      | 4 300                              | 14                   | 20          | 1,00                  | 26                  |
| LHF <sub>gs</sub> 3b (> 2,0 mm)      | 4 380                              | 13                   | 19          | 1,01                  | 27                  |

**Tableau 9**  
Finesse de mouture du LHF<sub>gh</sub> 3bis et des LHF<sub>gs</sub> broyés issus du démonstrateur

Les résultats d'essais sur mortiers utilisant des ciments de haut-fourneau riches en laitier (LHF<sub>gh</sub>/Clinker 75/25) sont présentés sur la figure 28.

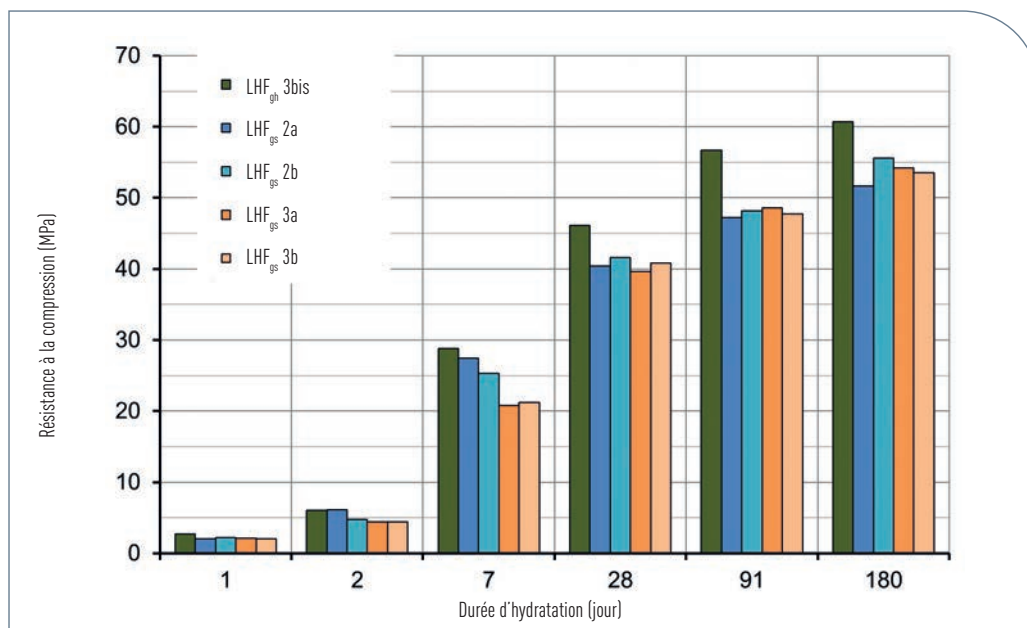
Dans tous les cas étudiés, on constate qu'à partir de 7 jours d'hydratation, la résistance des ciments à base de LHF est inférieure à celle des ciments de LHF<sub>gh</sub> 3bis. au jeune âge (1, 2 jours) l'influence du clinker est prédominante, il n'y a pas de différence significative de résistance, comme cela peut être le cas avec des LHF conventionnels, en particulier de plus faible basicité.

Aucune différence significative de résistance n'est observée entre les fractions de LHF<sub>gs</sub> les plus fines (LHF<sub>gs</sub> 3a) et les plus grossières (LHF<sub>gs</sub> 3b). Toutefois, cela n'a été vérifié que sur un seul cas.

La figure 29 montre l'évolution de la chaleur d'hydratation des ciments.

Comme l'évolution de la chaleur d'hydratation de ciments à 75% de LHF est généralement faible, en particulier pour les LHF de faible basicité, des mélanges de 50% de LHF<sub>gh</sub> 3bis, LHF<sub>gs</sub> 1a, LHF<sub>gs</sub> 1b et de 50% de ciment portland CEM I 42,5 R ont également été testés. Pour les mélanges 75%/25%, le second pic d'hydratation apparaît un peu plus tard pour les ciments à base de LHF<sub>gs</sub> que pour les ciments à base de LHF<sub>gh</sub> 3bis.



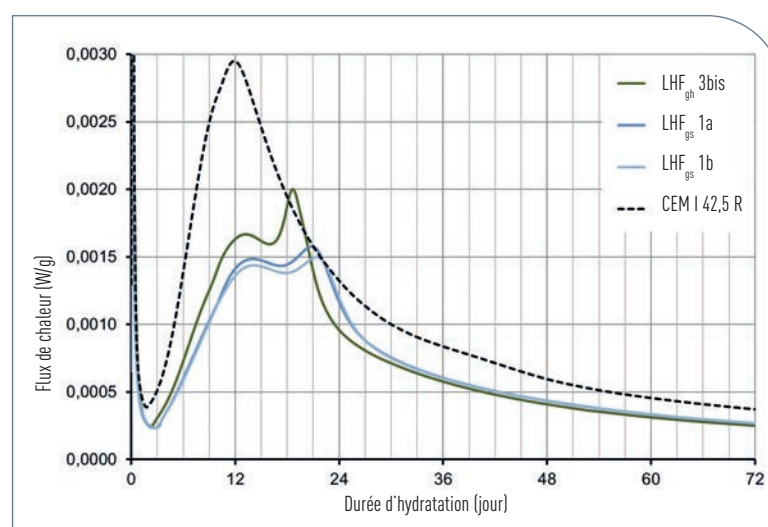
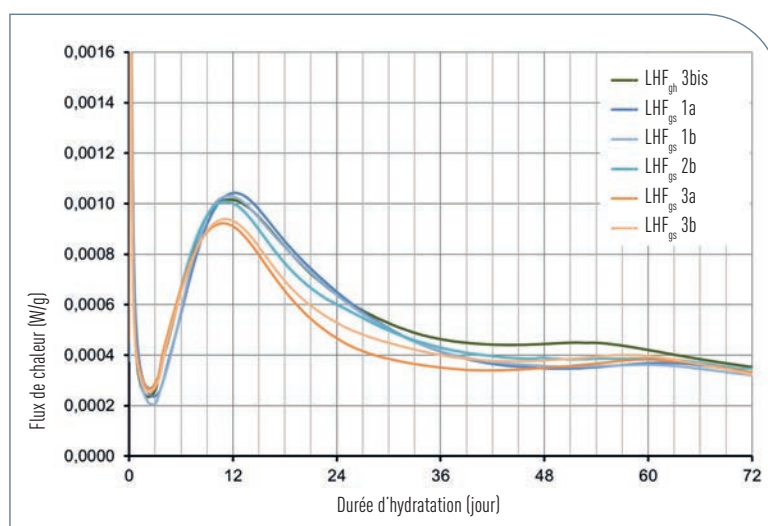


**Figure 28**  
Evolution de la résistance des ciments de haut-fourneau ( $LHF_{gh}/Clinker = 75/25$ ) à base de  $LHF_{gs}$  et du  $LHF_{gh}$  3bis

Pour les mélanges à 50 % de LHF, le deuxième pic d'hydratation se produit significativement plus tôt, compte tenu d'une activation alcaline plus forte. Néanmoins, il se produit un peu plus tard et de façon moins importante pour les deux ciments à base de  $LHF_{gs}$  1a et 1b. Par conséquent, les mesures de chaleur d'hydratation indiquent que les  $LHF_{gs}$  présentent une réactivité moins bonne que celles du LHF granulé humide.

La proportion des particules < 6  $\mu m$  (comparable pour les deux produits) joue un rôle prépondérant pour l'évolution de la chaleur d'hydratation et la résistance. Par conséquent, seule une petite part des faibles performances des  $LHF_{gs}$  broyés peut être attribuée à leur finesse inférieure par rapport à celle du  $LHF_{gh}$  3bis broyé (tableau 9).

La cause première des moins bonnes performances hydrauliques des  $LHF_{gs}$  réside dans les valeurs plus faibles de leur température fictive  $T_f$  et de leur enthalpie par rapport aux LHF granulé par voie humide (tableau 8). La plus faible enthalpie résulte d'une part d'une vitesse de refroidissement plus lente pour le processus de granulation à sec par rapport à la granulation par voie humide, d'autre part de la production de particules plus grossières qui refroidissent plus lentement que les particules plus fines.



**Figure 29**  
Chaleur d'hydratation des ciments de haut-fourneau ( $LHF_{gh}/Clinker = 75/25$  à gauche, ou  $LHF_{gh}/CEM I 42,5 R = 50/50$  à droite) à base de  $LHF_{gs}$  et du  $LHF_{gh}$  3bis

## Conclusions

Les résultats d'essais des différentes installations de granulation à sec à cuve rotative ont prouvé qu'il était possible d'obtenir des laitiers à très forts taux de verre, ce qui est une des conditions préalables à leur usage dans l'industrie cimentière.

Les particules de LHF<sub>gs</sub> générés sont principalement sphériques, peu poreuses et plus grossières que les LHF granulés à l'eau. Une fois broyés à 4 200 cm<sup>2</sup>/g (Blaine), ces laitiers peuvent être employés comme constituants du ciment et contribuer à sa résistance, même si elle reste plus faible que celle des LHF granulés à l'eau.

La réactivité des LHF dépend de leur enthalpie. Les ciments à base de LHF<sub>gs</sub> disposant d'une plus faible enthalpie, montrent donc une résistance plus faible que les ciments contenant des LHF granulés à l'eau, pour des caractéristiques de base (taux de verre, teneur en clinker, finesse...) similaires.

Néanmoins cela ne remet pas en question leur utilisation comme constituant principal du ciment, mais cela doit être pris en compte lors de la formulation des mortiers et des bétons, ... en particulier pour les LHF qui présenteraient une plus forte basicité.

Les résultats d'essais antérieurs, qui ne montraient aucune différence entre des LHF granulés par voie humide ou par voie sèche [29], s'expliquent probablement par le fait que seul un échantillon d'un mélange broyé contenant principalement du LHF granulé (à l'eau) a été testé, comme le montre le tableau 6.

Une question technique reste ouverte concernant la fabrication de ciment, celle de l'influence d'une forte basicité des laitiers.

L'efficacité du dispositif de récupération de chaleur reste également à démontrer d'un point de vue opérationnel et industriel. Des quantités d'air importantes sont nécessaires pour accélérer le refroidissement tout en maîtrisant la température cible pour l'obtention d'un produit de qualité (air chaud) à forte valeur ajoutée.

Ces résultats pourront également servir dans les réflexions à venir pour la conception éventuelle d'installations de refroidissement de laitiers d'aciérie ou des laitiers issus de la filière de réduction directe/four à arc électrique en vue de leur valorisation dans l'industrie cimentière.

## Remerciements

Le projet IGF n° 19416 du VDEh-Gesellschaft zur Förderung der Eisenforschung mbH [5] a été financé par le Ministère Fédéral de l'Economie et de l'Energie (BMWi) via l'AiF dans le cadre du programme de promotion de la recherche industrielle commune (IGF) sur la base d'une résolution du Parlement allemand. Le précédent projet de recherche BMWi 03ET1052 [2] a également été financé par le Ministère Fédéral de l'Economie et de l'Energie. Les projets FFG 838725 et 853550 [3,4] ont été financés par l'Agence autrichienne de promotion de la recherche. Les auteurs de cet article tiennent à adresser leurs remerciements pour ce soutien.

## Bibliographie :

- [1] Barati, M., Jahanshahi, S.: Granulation and heat recovery from metallurgical slags. *Journal of Sustainable Metallurgy* 6(2020) No. 2, pp. 191-206.
- [2] Siemens AG, FehS-Institut: Erforschung eines Verfahrens zur trockenen, glasigen Erstarrung von Schmelzflüssiger Hochofenschlacke kombiniert mit einer Wärmerückgewinnung DSG. Abschlussbericht zum BMWi-Forschungsvorhaben 03ET1052, Erlangen 2014.
- [3] Primetals Technologie Austria GmbH, voestalpine Stahl GmbH, FEhS-Institut, Montanuniversität Leoben: Forschungsvorhaben zur Wärmerückgewinnung mittels Trockenschlackengranulation FORWÄRTS 2.0. Abschlussbericht zum FFG-Forschungsvorhaben 853550, Linz 2019.
- [4] Ehrenberg, A.; Bornhöft, H.: Faktoren der Glasbildung von Hüttensand und deren Einfluss auf Glasstruktur und Reaktivität unter Berücksichtigung verschiedener Granulationsverfahren. Abschlussbericht zum AiF-Forschungsvorhaben 19416, Duisburg 2019.
- [5] Ehrenberg, A., Romero Sarcos, N., Bornhöft, H., Deubener, J.: Die Glasbildung von Hüttensand und ihr Einfluss auf die Hüttensandreaktivität. Report des FEhS-Instituts für Baustoff-Forschung e.V. 26 (2019) Nr. 2, S. 26-32.
- [6] Ehrenberg, A., Romero Sarcos, N., Bornhöft, H., Deubener, J.: Influence of the thermal history of granulated blast furnace slags on their latent-hydraulic reactivity in cementitious systems. *Journal of Sustainable Metallurgy* 6 (2020) No. 2, pp. 207-215.
- [7] Ehrenberg, A., Romero Sarcos, N., Bornhöft, H., Deubener, J.: The thermal history of granulated blast furnace slag and its impact on reactivity. *ZKG international* 73 (2020) No 4, pp.30-39.
- [8] Ueber die Verwerthung der Hohofenschlacken zu baulichen und anderen Zwecken, Zeischrift des Vereins deutscher Ingenieure 12 (1886) Nr. 1, S.31-40
- [9] Ehrenberg, A.:Hüttesand Ein leistungsfähiger Baustoff mit Tradition und Zukunft. *Beton-Informationen* 46 (2006) Nr. 4, S. 35-63, Nr. 5, S. 67-95.
- [10] Davy International: The Davy dry slag granulation process. *Iron and Steel* (1994) No.6, p. 6.
- [11] Jahanshahi, S., Pan. Y., Xie, D.: Some fundamental aspects of the slag dry granulation process. 9th International Conference on Molten Slags, Fluxes and Salts, Beijing 2012.
- [12] Yasutaka, T., Tobo, H., Watanabe, K., Development of manufacturing process for blast furnace slag coarse aggregate with low water absorption. JFE Technical Report (2018) 23.
- [13] Kappes H., Michels, D.: dry slag granulation with energy recover: From inception to pilot plant. European Steel Environment & Energy Congress (ESEC), Teesside 2014.
- [14] McDonald, I.: Dry slag granulation with heat recovery. 7<sup>th</sup> European Slag Conference, Ijmuiden 2013.
- [15] Ehrenberg, A., Mundersbach, D., Werner, A., Danov, V.: Ein Verfahren zur trockenen Erstarrung schmelzflüssiger Hochofenschlacke mit dem Ziel einer Wärmerückgewinnung. Report des FehS-Instituts für Baustoff-Forschung e.V., 22 (2015) Nr.1, s. 19-24
- [16] Pronina, N., Krüger, S., Bornhöft, H., Deubener, J., Ehrenberg, A.: Cooling history of a wet-granulated blast furnace slag. *Journal of Non-Crystalline Solids* 499 (2018), pp. 344-349.
- [17] Romero Sarcos, N., Hart, D., Bornhöft, H., Ehrenberg, A., Deubener, J.: Rejuvenation of granulated blast furnace slag (GBS) glass by ball milling. *Journal of Non-Crystalline Solids* 556 (2021) 120557.
- [18] Roggendorf, H., Ehrenberg, A.: Die Glasstruktur von Hüttensanden und ihr Einfluss auf baustoff-relevante Eigenschaften. Schlussbericht zum AiF-Forschungsvorhaben 16621, Duisburg 2015.
- [19] Ludwig, H.-M., Wulfert, H., Wimmer, G., Fleischanderl, A.: Trockene Granulation zur Herstellung von Hüttensanden. 20. ibausil, Weimar 2018.
- [20] Verfahren und Vorrichtung zur Nutzung der bei der Granulation einer flüssigen Schlacke freigesetzten Abwärme. WO 2011/036180 A1, 31.03.2011.
- [21] Grade, K., Schröder, F.: Mikroskopische Methoden zur Ermittlung des Galsgehalts von Hüttensanden und Verfahren zur Bestimmung der Hüttensandgehalte in Hochofenzementen. FehS-Institut, Duisburg 1962.
- [22] Xie, D. et al.: Heat recovery from slag through dry granulation. First CSRP Annual Conference, Melbourne 2007.
- [23] Fenzl, T.: Dry granulated BF sand: A ground breaking and sustainable innovation - Production process, product grinding and building materials investigations. 14. Global Slag Conference, Aachen 2019.

# Que sont devenus les laitiers en 2020 ?



Comme chaque année et pour la quinzième année, le Centre Technique et de Promotion des Laitiers sidérurgiques (CTPL) a lancé en 2021 l'enquête nationale relative aux flux de laitiers sidérurgiques produits sur le territoire national en 2020. Cette enquête vise également à recueillir les données relatives à leurs principales filières d'utilisation par différents secteurs industriels.



Comme chaque année et pour la quinzième année, le Centre Technique et de Promotion des Laitiers sidérurgiques (CTPL) a lancé en 2020 l'enquête nationale relative aux flux de laitiers sidérurgiques produits sur le territoire national en 2020. 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 (2010 - 2019). 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.

L'année 2020 a été marquée par une baisse significative de la production des laitiers en France, comprise entre 20 % et 40 % par rapport à l'année 2018.

Ceci est lié en partie à la fin du déstockage des flux d'aciers, entamé en 2019 en raison de la crise sanitaire de la COVID-19, et d'autre part à des commandes réalisées en flux tendus au cours de 2020 compte tenu des incertitudes de l'économie mondiale dans de nombreux secteurs. Ce contexte économique mondial a ainsi conduit les sites sidérurgiques français à adapter leurs conditions opérationnelles, et à réduire les flux de production, en particulier sur le premier semestre 2020.

| TYPE DE LAITIERS                                               |                  | 2011         | 2012         | 2013         | 2014         | 2015         | 2016         | 2017         | 2018         | 2019         | 2020         |
|----------------------------------------------------------------|------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| LHF                                                            | LHF totaux       | 2 847        | 2 866        | 3 081        | 3 407        | 2 983        | 3 003        | 3 034        | 2 990        | 3 002        | 2 342        |
|                                                                | LHF granulés     | 2 323        | 1 902        | 2 127        | 2 475        | 2 185        | 2 310        | 2 572        | 2 479        | 2 531        | 2 009        |
|                                                                | LHF cristallisés | 524          | 964          | 954          | 932          | 798          | 693          | 462          | 511          | 470          | 332          |
| Laitiers d'aciérie de conversion                               |                  | 1 136        | 1 135        | 1 258        | 1 187        | 1 265        | 1 072        | 955          | 1 136        | 1 153        | 927          |
| Laitiers d'aciérie électrique (aciers carbone)                 |                  | 732          | 734          | 607          | 503          | 442          | 420          | 423          | 461          | 396          | 272          |
| Laitiers d'aciérie électrique (aciers inox et alliés spéciaux) |                  | 116          | 120          | 115          | 211          | 185          | 173          | 172          | 170          | 148          | 124          |
| <b>Total</b>                                                   |                  | <b>4 831</b> | <b>4 855</b> | <b>5 061</b> | <b>5 308</b> | <b>4 875</b> | <b>4 668</b> | <b>4 623</b> | <b>4 757</b> | <b>4 699</b> | <b>3 665</b> |

**Tableau 1**

Synthèse des productions de laitiers en France en 2020 (en kT)

Cette situation se traduit dans les faits par :

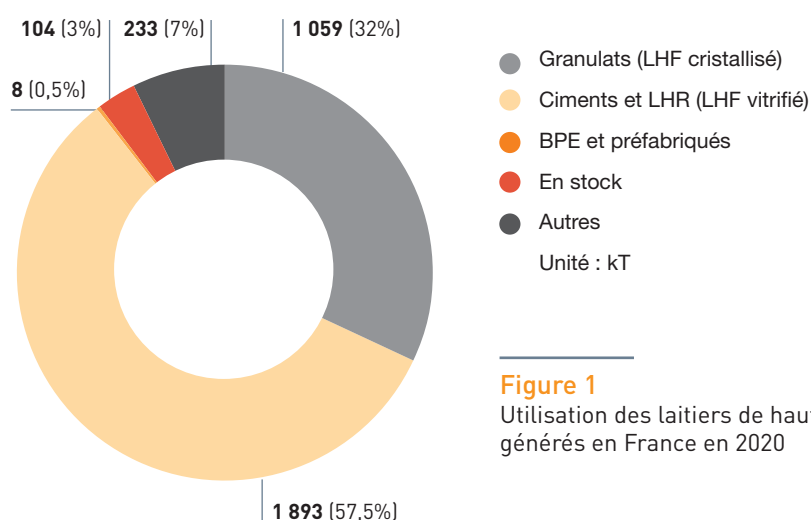
- Une baisse de 20 % de la production de laitier de haut-fourneau granulé, et de 40 % de la production de laitier de haut-fourneau cristallisé.
- Une baisse de 22 % de la production des laitiers d'aciérie de conversion (par rapport aux flux constants depuis 2014).
- Une baisse de 40 % pour les laitiers d'aciérie issus de la filière carbone.

## Laitiers de haut-fourneau

La production de laitiers de haut-fourneau s'est établie pour l'année 2020 à 2,30 millions de tonnes, issues des sites Arcelormittal de Fos-sur-Mer et Dunkerque<sup>1</sup>, ainsi que du site Saint-Gobain de Pont-à-Mousson. Le ratio entre la partie cristallisée (13%) et celle granulée (87%) confirme que la grande majorité de la production est vitrifiée (granulation humide), compte tenu de l'intérêt économique de ces matériaux.

La figure 1 montre que la totalité des tonnages produits en 2020 ont été valorisés et que des stocks anciens ont également été absorbés. Cela s'applique aussi bien pour les laitiers granulés que pour les laitiers cristallisés. Ces derniers sont utilisés massivement comme granulats dans l'industrie routière. Les laitiers granulés sont comme d'habitude consommés par l'industrie cimentière et par le marché du béton.

En 2020, certains marchés comme la laine de roche continuent de consommer des laitiers de haut-fourneau cristallisés. Même si les tonnages sont modestes, cela correspond à un marché de l'isolation qui est pérenne.



**Figure 1**  
Utilisation des laitiers de haut-fourneau générés en France en 2020

## 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 1,3 millions de tonnes pour l'exercice 2020, en baisse de 25% par rapport à 2018.

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

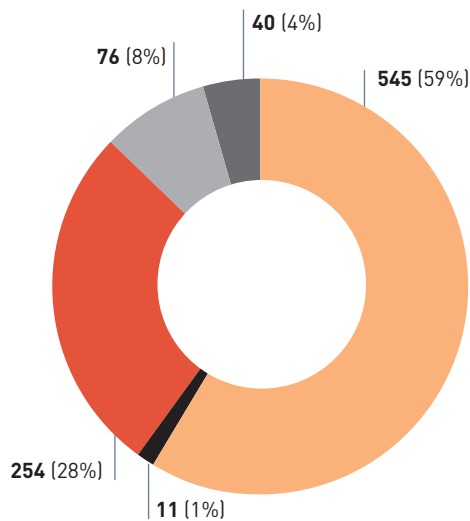
1- Le site Arcelormittal de Florange ne produit plus de laitiers de haut-fourneau depuis 2012 suite à l'arrêt de la filière chaude (mise sous « cocon » en avril 2013).

## Les laitiers de convertisseur (LAC)

Les laitiers de convertisseur à oxygène (appelés aussi laitiers LD), associés aux laitiers de débordement et aux laitiers de désulfuration issus de la filière fonte représentent 70 % des tonnages de laitiers d'aciérie produits en 2020 (près d'1 MT).

Il faut préciser que l'enquête a été beaucoup plus détaillée et a conduit à des chiffres plus précis en matière de laitiers de convertisseurs au sens propre.

Il est à noter que 64 % des Laitiers de convertisseurs produits en 2020 sont valorisés (TP, industrie des liants hydrauliques, agriculture ...). La mise en stock et le recyclage en interne est de 36 %.



**Figure 2**

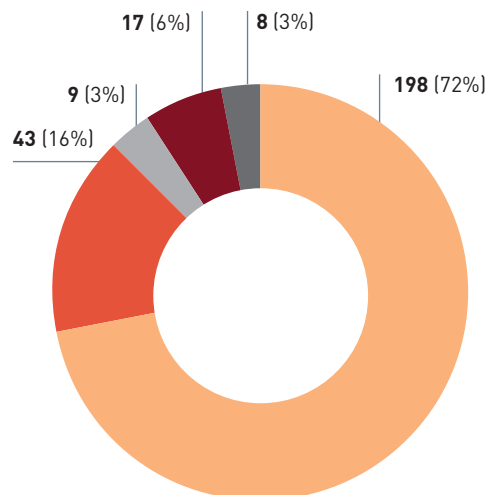
Orientation des laitiers de convertisseur générés en France en 2020

- Travaux publics
  - Fabrication liant hydraulique
  - En stock
  - Recyclage interne
  - Autres
  - Mise en décharge
- Unité : kT

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

Ils représentent 20,5 % des tonnages de laitiers d'aciérie produits en 2020, soit 0,27 million de tonnes.

Compte tenu des propriétés intrinsèques de ces laitiers, l'essentiel des tonnages (72 %) est utilisé comme granulats en technique routière. En 2020 la mise en stock pour maturation avant usage est stable par rapport à 2018 (16 %).



**Figure 3**

Utilisation des laitiers d'aciérie électrique issus de la filière carbone en 2020

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

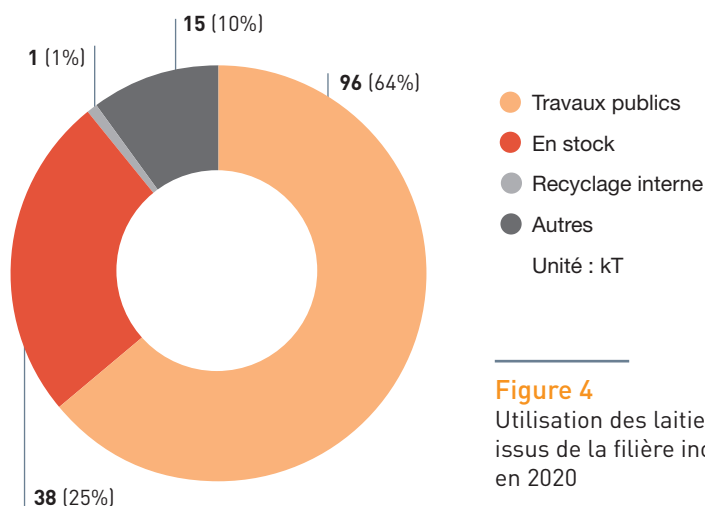
Ils représentent en 2020, 9,4 % des tonnages de laitiers d'aciérie produits sur le territoire, soit environ 0,12 million de tonnes.

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 valorisation restent également assez semblables :

- 64 % sont utilisés en technique routières
- 25 % vont en stockage interne en attente de débouchés,
- 1 % utilisé en recyclage interne.

Aucun tonnage de ces laitiers n'est orienté vers le stockage réglementé.

A noter qu'une partie de ces laitiers font l'objet de traitement spécifique (jiggage) dans le but de récupérer des métaux dont le coût est élevé (Molybdène).



**Figure 4**

Utilisation des laitiers d'aciérie électrique issus de la filière inox et alliés spéciaux en 2020

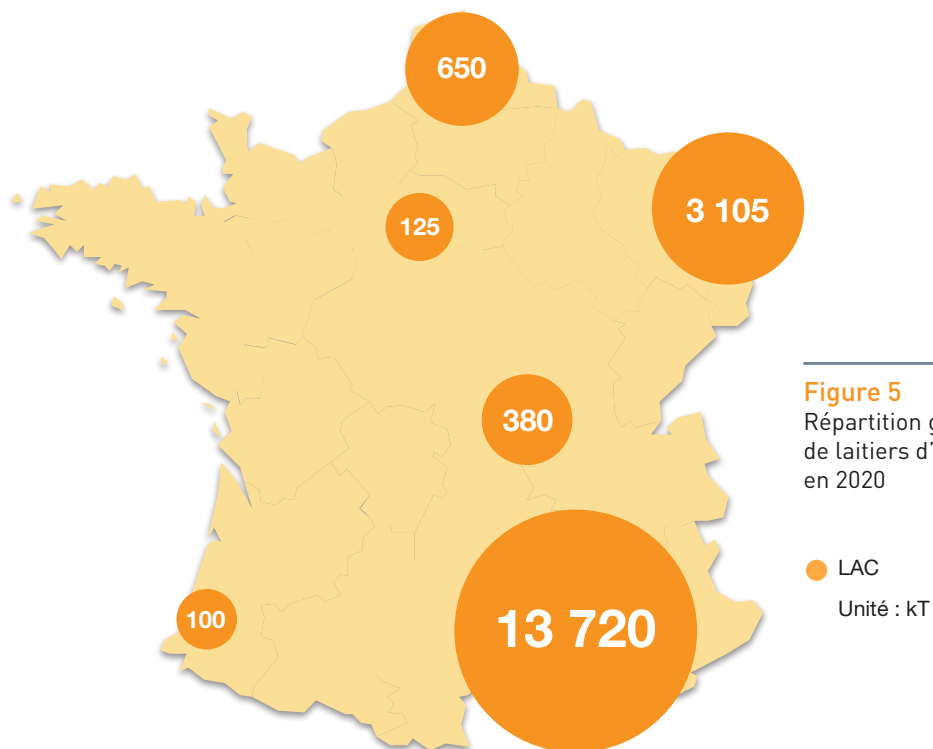
### Gestion des stocks historiques

A la fin de l'année 2020, les stocks de laitiers recensés restent encore importants à l'échelle du territoire (près de 30 millions de tonnes), en particulier pour les laitiers de haut-fourneau cristallisés issus du passé (XIX<sup>ème</sup> et XX<sup>ème</sup> siècles - environ 15 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), 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, de 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 2020

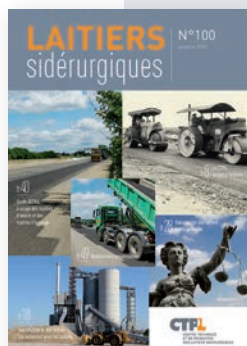
Pour plus d'information, vous pourrez évidemment retrouver en ligne la présentation synthétique de ces données sur le site internet du CTPL.

Rendez-vous à l'adresse suivante :

<https://www.ctpl.info/wp-content/uploads/2021/11/Stats-LHF-2020-2019.pdf>

<https://www.ctpl.info/wp-content/uploads/2021/11/Stats-laitiers-acierie-2020-2019.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  
*Jérémie Domas : CTPL*
- **Valorisation des laitiers : cadre juridique**  
Etat des lieux juridique et statut des laitiers sidérurgiques  
*Jacques Reynard : CTPL*
- **Guide SETRA, à usage des maîtres d'œuvre et des maîtres d'ouvrage**  
Le guide SETRA pour l'acceptabilité environnementale des laitiers sidérurgiques en technique routière  
*Jérémie Domas : CTPL*
- **Réalisations remarquables**
- **Les laitiers HF et d'aciérie : quel avenir pour les 20 prochaines années ?**  
Perspectives économiques, réglementaires et techniques quant à la valorisation des laitiers sur les 20 prochaines années.  
*Jean-Marie Delbecq : BSME*

## N° 104 (mai 2015)

- **Avec les LAC, ça pousse !**  
Amendement des sols. Les laitiers sidérurgiques et leurs usages agricoles : un marché pérenne à fort potentiel.  
*Marc Fixaris : ArcelorMittal B.S.M.E*
- **Les laitiers au secours de l'agriculture !**  
Caractéristiques et apports des laitiers sidérurgiques en usages agricoles.  
*Mary Provance-Bowley : Harsco Metals and Minerals - Sarver, PA, USA*



## N° 105 (Octobre 2015)

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

Captage du phosphore dissout dans les eaux de ruissellement et de drainage.

*Chad PENN : Professeur Associé Oklahoma State University - Department of Plant and Soil Science*

### • Que sont devenus les laitiers en 2014 ?

Production et devenir des laitiers sidérurgiques en 2014 en France

*Jérémie Domas : CTPL*

### • Eaux usées :

#### Les laitiers démontrent leur efficacité

Utilisation des laitiers pour le traitement des eaux usées

*Florent Chazarenc : Ecole des Mines de Nantes*

*Marc Fixaris :*

*Arcelormittal/BSME*

## N° 106 (Juin 2016)

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

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

*George Wang et Yuhong Wanga : Department of Construction Management, East Carolina University, Greenville, Etats-Unis*

*Zhili Gaob : Department of Construction Management and Engineering, North Dakota State University, Fargo, États-Unis*

### • Des laitiers qui ont du caractère !

Caractérisation de l'expansion des laitiers d'aciérie à l'autoclave

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

## N° 107 (Juin 2017)

### • Laitiers LD : Ils tiennent la route !

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

*J. Grönniger, M. P. Wistuba et I. Isailović :*

*TU Braunschweig, ISBS, Germany*

*M. Mauhart : Voestalpine Stahl GmbH, Austria*

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

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

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

## N° 108 (Décembre 2017)

### • Vu et pratiqué : retours d'expériences

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

### • Que sont devenus les laitiers en 2016

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

## N° 109 (Juin 2018)

### • Les laitiers sur 3 frontières

9<sup>ème</sup> conférence Euroslag

### • Radioactivité : les LHF aptes pour la construction

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

P. Gauje : ArcelorMittal France, Global Research and Development, Maizières Process  
F. Hanrot : ArcelorMittal Luxembourg, European Procurement Organisation - By-Products Sales  
M. B. Mokili, M. Bailly, I. Deniau : Laboratoire Subatech

### • LAFE : à chacun sa personnalité !

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

## N° 110 (Décembre 2018)

### • Laitiers moulus : de la fonte au béton

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

### • Ouverture d'une nouvelle usine ECOCEM à Dunkerque



### • Révéler et développer la valeur ajoutée des laitiers moulus

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

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

### • Que sont devenus les laitiers en 2017

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

## N° 111 (juin 2019)

### • Expansion volumique : vers un meilleur contrôle

Etat des lieux des essais en matière d'expansion volumique des laitiers d'aciérie et perspectives

Pascal Leconte : CTPL

Chen Lin : Ecoke des Mines de Douai

### • Granulats de LAFE : des perspectives en béton !

Bétons hydrauliques réalisés à partir de granulats de LAFE : spécificités et limites d'emploi.

Pascal Leconte : CTPL

Isabelle Moulin, Emmanuel Perin : LERM

## N° 112 (Octobre 2020)

### • En marche vers une filière « zéro déchet »

Approche hydrométallurgique alcaline pour la gestion des laitiers sidérurgiques

N. Kana<sup>1</sup> - A. Seron<sup>1</sup> - F. Pereira<sup>2,3</sup> - N. Menad<sup>1</sup> - S. Ho-Van<sup>2,3</sup> - J.P. Baron<sup>4</sup> :

1 - Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM)

2 - Association pour la Recherche et le développement des Méthodes et processus Industriels (ARMINES)

3 - Mines Saint-Étienne

4 - Industeel ArcelorMittal France

### • Des laitiers aux ressources multiples

Procédés innovants pour la récupération des métaux contenus dans les laitiers sidérurgiques

K. Bru - N. Menad : Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM)

### • Que sont devenus les laitiers en 2018

Production et devenir des laitiers sidérurgiques en 2018 en France

Pascal Leconte : CTPL



**LAITIERS**  
sidérurgiques

[www.ctpl.info](http://www.ctpl.info)