

LAITIERS sidérurgiques

N°103

octobre 2014

page 6

Actualaitiers

page 20

**Où sont passés
les laitiers en 2013 ?**

Production et devenir des laitiers
sidérurgiques en 2013

page 26

**Des laitiers
à fort potentiel !**



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

page 8

Des LAC valorisés, pour un retour à la source

VALORISATION DES LAITIERS D'ACIÉRIE DE CONVERSION :
INFLUENCE DES CONDITIONS DE REFROIDISSEMENT SUR LA
NATURE ET LA TAILLE DES PHASES MINÉRALES

CTPL

CENTRE TECHNIQUE
ET DE PROMOTION
DES LAITIERS SIDÉRURGIQUES

est



Produire des laitiers sidérurgiques à fort potentiel de valorisation

Les articles habituellement publiés dans cette revue témoignent, dans la quasi-totalité des cas, d'usages innovants ou décrivent des techniques améliorées de mise en œuvre de laitiers sidérurgiques dans différents domaines de valorisation et dans différents pays, compte tenu des réglementations en vigueur. En effet, la volonté éditoriale du CTPL a toujours été de favoriser la mise en valeur de nouveaux emplois et de nouveaux marchés de façon à promouvoir le développement de nouvelles filières auprès de nos lecteurs.

Il serait toutefois dommage que cette ligne éditoriale amène à penser que toutes les innovations relatives à la valorisation des laitiers sidérurgiques ne concernent que le développement en aval du process sidérurgique, et ne sont que le fruit de la réflexion et de l'expertise de ses partenaires industriels.

La sidérurgie, de son côté, et en dépit du contexte économique morose qu'elle connaît, ne baisse pas les bras et ne relâche pas ses efforts... même lorsque ceux-ci ne concernent pas directement son métier de base, la production d'acier.

Ainsi que vous pourrez le lire au fil des articles de ce numéro 103, tant nos collègues autrichiens que français sont toujours à la recherche de nouveaux traitements permettant d'améliorer la qualité de leurs laitiers, ou la régularité de cette qualité, en vue d'une meilleure valorisation à de meilleurs coûts, économiques et environnementaux.

Si nos collègues de Siemens Metals Technologies, avec comme partenaire industriel le site sidérurgique de Voestalpine Stahl de Linz, revisitent la technologie du « boulettage » des laitiers de

haut-fourneau avec, en sus, la récupération de l'énergie calorifique, ceux d'ArcelorMittal R&D, avec l'aide du CEMHTI/CNRS et de l'INSA de Lyon, s'intéressent aux modalités de refroidissement des laitiers d'aciérie de conversion et à l'influence de celui-ci sur leur minéralogie.

Dans ces deux cas, la mise au point et la maîtrise d'un refroidissement contrôlé des laitiers apparaissent bien comme des paramètres prépondérants à la mise en place de filières à plus haute valeur ajoutée. Le refroidissement contrôlé est d'ores et déjà une technique largement répandue sur la plupart des sites français dans le but de générer un matériau adapté aux usages en technique routière ou en BTP. Dans les deux cas présentés dans ce numéro, il s'agit là d'affiner la connaissance des phénomènes en jeu afin d'autoriser l'optimisation de la valorisation de tous les éléments contenus dans les laitiers sidérurgiques.

Ces articles prouvent bien, s'il en était encore besoin, que les laitiers, en Europe, ne méritent en aucun cas l'appellation de « déchets » : ce sont de véritables produits issus de la sidérurgie et élaborés grâce à des opérations de valorisation volontaires et parfaitement maîtrisées. Souhaitons que l'administration française partage ce point de vue et facilite la reconnaissance rapide d'un état de fait connu depuis des décennies.

Jacques Reynard
Délégué Général du CTPL

page **6** **Actualaitiers**

page **8** **Les LAC valorisés**
pour un retour à la source



J. POIRIER, G. THEVENIN, C. DUEE, C. BOURGEL
CEMHTI, CNRS UPR3079/Université d'Orléans

M. GAUTIER
INSA de Lyon

D. POIRIER
ArcelorMittal Maizières, Research and Development

Le laitier d'aciérie de conversion (LAC) brut contient des matières de valeur pour la sidérurgie, notamment du fer et de la chaux.

En réutilisant le LAC comme matière première pour la production de l'acier, il serait possible de réaliser des économies de minerai de fer et de calcaire, d'autant plus appréciables dans un contexte de tension sur les matières premières.

Cependant, compte tenu de la teneur élevée en phosphore du LAC, cette voie de valorisation a été jusqu'ici écartée.

L'enjeu de l'étude présentée ici consiste à déterminer en laboratoire un processus de cristallisation du LAC qui permette de séparer ses composants en vue de récupérer la valeur fer avec une faible contamination en phosphore pour une partie et d'identifier une voie de valorisation à forte valeur ajoutée pour l'autre fraction minérale.

Des essais industriels en vraie grandeur sont actuellement en cours pour préciser la réalité «sur le terrain» de ces résultats de laboratoire.

Que sont devenus les laitiers en 2013 ?

Comme chaque année et pour la neuvième année consécutive, le Centre Technique et de Promotion des Laitiers sidérurgiques (C.T.P.L.) a lancé en 2013 l'enquête nationale relative aux flux de laitiers sidérurgiques produits sur le territoire national, en collaboration avec la Fédération Française de l'Acier (F.F.A.). Cette enquête vise également à recueillir les données relatives à leurs principales filières d'utilisation par différents secteurs industriels.

Jérémie DOMAS - CTPL

Des laitiers à fort potentiel !



Près de 400 millions de tonnes de laitiers de haut-fourneau sont produites dans le monde chaque année. Ces laitiers, lorsque granulés, sont généralement utilisés en cimenterie ou en construction routière.

Soucieux d'optimiser leur valorisation, Siemens Metals Technologies, en partenariat avec le site sidérurgique de Voestalpine Stahl en Autriche, a mené un projet de R&D visant à étudier une technologie de granulation à sec des laitiers de haut-fourneau. Utilisant de l'air pour le refroidissement des laitiers, cette technologie devrait permettre non seulement de réaliser de grosses économies d'eau, mais surtout de récupérer de la chaleur à échelle industrielle pour des applications en chauffage ou pour la génération d'énergie électrique. L'étude devait également vérifier que les laitiers ainsi granulés respectent bien les mêmes spécifications et critères que les LHF granulés par voie humide.

Il ressort que le laitier de haut fourneau liquide représente une des plus importantes réserves d'énergie thermique pour l'industrie sidérurgique et que sa granulation à sec permet d'aboutir à un produit de première qualité, facile à utiliser par les cimentiers.

Des atouts, tant pour le sidérurgiste que pour les cimentiers, qui ouvrent la voie à une valorisation à haute valeur ajoutée.

Ian J McDONALD, SIEMENS VAI métaux Technologies, Royaume Uni
Andrea WERNER, SIEMENS VAI métaux Technologies, Autriche

LAITIERS SIDÉRURGIQUES

68^{ème} année

Revue éditée et diffusée gratuitement par le CTPL

Directeur de la publication

Jacques REYNARD,
Délégué Général

Rédacteur en chef

Jérémie DOMAS,
Directeur

Rédaction

CTPL
Immeuble Aristote
25, boulevard Victor Hugo
31770 Colomiers

Siège social du CTPL

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

Conception - Réalisation

BC Consultants :
01 30 74 09 00

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

Crédit photos :
CTPL, Fotolia, Masterfile

N° ISSN 1166 - 3138

Dépôt légal :

4^{ème} trimestre 2014

Fonctionnement du CTPL

Réunions de l'AG et du CA du CTPL

Les dernières réunions du Conseil d'Administration (CA) et de l'Assemblée Générale (AG) du C.T.P.L. se sont tenues le mercredi 23 avril 2014. A cette occasion, un état des lieux complet des travaux techniques, réglementaires et normatifs réalisés au cours de l'année 2013 a été présenté, ainsi que les perspectives techniques et budgétaires de l'association pour l'année 2014.

Bernard Creton ayant décidé de mettre un terme à ses activités professionnelles, c'est Jacques Reynard qui a été nommé président du CTPL. La prochaine réunion du CA se déroulera au mois de décembre 2014.

Journée d'échanges du CTPL

Les Adhérents du CTPL ont à nouveau pu se rencontrer lors de la dernière journée d'information, organisée le jeudi 18 septembre dernier. Celle-ci a été l'occasion de présenter les actions futures à engager par l'Association lors des prochaines années afin de recueillir l'avis des adhérents en vue de la finalisation d'un plan pluriannuel d'actions pour la période 2015-2018.

Des perspectives motivantes et encourageantes pour l'ensemble de la profession.

Ayez le réflexe de visiter régulièrement notre site : www.ctpl.info !

Réglementation nationale et européenne

L'administration encourage (enfin) la valorisation des matériaux alternatifs

Afin de promouvoir la valorisation de déchets minéraux en technique routière, des outils méthodologiques ont été élaborés par le Ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie (MEDDE) et les professionnels. Ils visent à fournir aux maîtres d'ouvrage, maîtres d'œuvre et entreprises, les prescriptions et exigences opérationnelles relatives à l'acceptabilité mécanique et environnementale, des matériaux alternatifs en technique routière.

Une journée d'échange a été organisée par la Direction Générale de la Prévention des Risques (DGPR) du Ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie (MEDDE) et coordonnée par le CEREMA et l'ENTPE, pour présenter aux acteurs des travaux publics, l'état de l'art pour l'utilisation des matériaux alternatifs en technique routière.

Les présentations et le témoignage des intervenants peuvent être consultés à l'adresse suivante : <http://www.cete-lyon.developpement-durable.gouv.fr/journee-d-echanges-sur-la-r365.html>.

Vous pourrez également retrouver sur le site les liens vers les guides et documents présentés lors de cette journée. Une reconnaissance des travaux engagés par le CTPL et ses Adhérents !

Bientôt la «sortie du statut de déchet» pour les laitiers sidérurgiques ?

Le Décret n° 2012-602 du 30 avril 2012 relatif à la procédure de sortie du statut de déchet, ouvre la possibilité pour un flux de déchets de perdre son statut juridique de déchet s'il respecte les exigences de ce décret, et démontre que l'ensemble des conditions environnementales et de marché sont réunies. A la demande de ses adhérents, le CTPL a élaboré un dossier de demande pour les laitiers sidérurgiques, en liaison avec les services de la DGPR du MEDDE.

A ce jour, le dossier a été officiellement déposé en février 2014 et est en phase d'instruction par les services compétents de l'Administration. Il devrait ainsi être prochainement présenté devant la Commission Consultative sur la sortie du statut de déchet.

Une opportunité indispensable pour certains flux de laitiers, afin de lever les réticences administratives ou psychologiques encore existantes, pérenniser les marchés existants depuis de nombreuses années, et assurer l'économie des ressources minérales naturelles... Une nécessité, également, pour tous les laitiers employés comme granulats

puisque les prochaines «matières» qui devraient se voir octroyer la possibilité de sortir du statut de déchet seront les matériaux de déconstruction et de démolition du BTP.

La Commission Européenne publie une étude très contestable !

Le Joint Research Center (JRC), service d'études techniques et scientifiques de la Commission Européenne, vient de publier en septembre dernier après 3 ans de gestation (sans doute trop longue !) une étude relative à la méthodologie de détermination des valeurs limites en substances dangereuses émises à partir de granulats, en particulier dans le cadre de l'usage de ces seuils pour la sortie du statut de déchet tel qu'ouvert par l'article 6 de la Directive cadre déchets (2008/98/CE).

Dans le cadre de cette étude, on se propose de faire un état des lieux des caractéristiques des principales sources utilisées comme granulats (y compris les laitiers sidérurgiques), et de réaliser un retour d'expérience des problématiques environnementales rencontrées en Europe.

Au résultat : une étude basée sur des données non représentatives et des constats hors de propos des pratiques existantes. Ni, le CTPL, ni le FEHS, ni l'UNESID n'ont été contactés dans le cadre des laitiers... autant dire, quelle signification et quelle attention donner à cette étude ?!

International

Réunion des Groupes de Travail d'EUROSLAG

La dernière réunion des groupes de travail d'EUROSLAG s'est tenue au FEHS (Duisbourg, Allemagne) le jeudi 22 mai 2014. L'occasion pour le CTPL de faire le point avec l'ensemble des acteurs sur les problématiques normatives et réglementaires, et d'échanger sur les actions techniques en cours au sein des Etats Membres de l'UE.

La prochaine Assemblée Générale de l'Association européenne des producteurs et opérateurs des laitiers sidérurgiques, EUROSLAG, se tiendra le mercredi 10 décembre 2014 au FEHS à Duisbourg, afin d'échanger avec nos partenaires européens sur les problématiques relatives à la gestion des laitiers sidérurgiques.

Conférence EUROSLAG

La 8^{ème} conférence EUROSLAG se déroulera du 21 au 23 octobre 2015 à Linz (Autriche), sous l'organisation de la société Voestalpine. Cette conférence offre régulièrement l'opportunité à nos Adhérents et aux scientifiques européens de nous faire partager leurs expériences et les technologies innovatrices en termes de gestion des laitiers.

Travaux d'EUROFER en relation avec la méthode d'allocation des émissions polluantes aux laitiers sidérurgiques

Après de nombreux débats, souvent stériles, le secrétariat du groupe de travail «Product Related Environmental Footprint» a acté le fait qu'aucun consensus n'avait pu être trouvé quant à la méthode d'allocation de la charge environnementale sur les laitiers sidérurgiques. En conséquence, un rapport a été préparé à destination du comité des Vice-Présidents d'EUROFER recommandant, dans l'attente du développement éventuel d'une méthode faisant consensus, d'appliquer l'une des trois méthodes préconisées dans la NF EN 15804 (partition, allocation « physique » ou allocation fondée sur la contribution économique).

Conférence NSA

La prochaine Conférence internationale de la National Slag Association (NSA) se déroulera près de Jacksonville (Floride, USA), du 29 septembre au 2 octobre 2014. L'occasion pour tous de partager des expériences sur la valorisation des laitiers sidérurgiques, et pour nous, de tirer partie des pratiques et des expériences de nos collègues d'outre-Atlantique.

Normalisation

CEN/TC 51 – Ciment et liants hydrauliques

Enfin ! Le projet de norme prEN 13282-2 est soumis au vote formel via la procédure UAP. L'adoption probable de ce texte à fin 2014 (après un retard de 4 ans !) permettra de justifier de l'usage courant de laitiers d'aciérie de convertisseur (à hauteur de 40% en masse) dans la composition de liants hydrauliques routiers à vitesse de prise normale.

CEN/TC104 – Bétons

WG15

A la demande d'ECOCEM, un courrier a été préparé et envoyé par le Pr Harrison, Chairman du TC104/WG15, au Chairman du TC104. Dans sa réponse, ce dernier autoriser le WG15 à incorporer dans son mandat l'étude des modalités d'utilisation de sulfate de calcium anhydre comme activant du laitier granulé moulu. Cet échange de courriers a pris deux ans !

Commission nationale «béton» Groupe P18B/GE RE

Suite à l'établissement du groupe d'experts « retours d'expériences » (GE RE), un questionnaire standard a été réalisé par ce groupe, validé par la commission béton (P18B) et doit maintenant permettre de recueillir toutes les informations relatives aux performances recherchées (et atteintes !) par les bétons d'ingénierie, récemment introduits dans la nouvelle norme NF EN 206/CN et permettant, sous certaines conditions (assez contraignantes) d'utiliser davantage de laitier de haut-fourneau granulé moulu en addition dans certains bétons que ce qu'autorisait l'ancienne norme jusqu'à ce jour.

CEN/TC154 – Granulats

WG13 – Substances dangereuses réglementées émises par les granulats

Le WG13 s'est réuni le 24 juin dernier à Londres à l'Association des Produits Minéraux (MPA), afin d'évoquer les conséquences normatives de la prise en compte des travaux du TC351. Le groupe de travail essaie d'anticiper la prise en compte de ces exigences pour les granulats en préparant des «dossiers» par typologies (natures) de granulats, permettant de déterminer quelles sont les substances dangereuses qui seront les plus problématiques de granulats à granulats, et comment peut se faire l'évaluation et la Déclaration de performances (DoP).

Un sujet complexe compte tenu de la multiplicité des sources, de la multiplicité des substances à prendre en compte, et de la méthodologie à retenir pour l'évaluation des données. Pour les laitiers sidérurgiques, une réflexion est d'ailleurs en cours au sein d'EUROSLAG, et une réunion se tiendra prochainement au FEHS le 16 octobre 2014.

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

WG1 – Emission dans l'eau

Le programme de robustesse élaboré sur les procédures d'évaluation des émissions dans l'eau par lixiviation s'est achevé en 2013. Il a permis de finaliser les procédures concernant :

- l'arbre de décision pour déterminer le choix de l'essai à réaliser en fonction des caractéristiques du produit de construction
- l'essai de lixiviation de surface pour produits monolithiques

La publication de ces deux procédures a été votée et les résultats de l'enquête ont été examinés à la réunion du WG1 de février 2014. Après confirmation par le TC351, ces deux spécifications techniques seront donc publiées sous les références CEN/TS 16637-1 et -2.

La procédure d'essai pour les produits granulaires percolants laisse apparaître plus de difficultés techniques, et sa publication ne sera pas effective avant le début de l'année 2015.

Des LAC valorisés pour un retour à la source

Le laitier d'aciérie de conversion (LAC) brut contient des matières de valeur pour la sidérurgie, notamment du fer et de la chaux.

En réutilisant le LAC comme matière première pour la production de l'acier, il serait possible de réaliser des économies de minerai de fer et de calcaire, d'autant plus appréciables dans un contexte de tension sur les matières premières.



Cependant, compte tenu de la teneur élevée en phosphore du LAC, cette voie de valorisation a été jusqu'ici écartée.

L'enjeu de l'étude présentée ici consiste à déterminer en laboratoire un processus de cristallisation du LAC qui permette de séparer ses composants en vue de récupérer la valeur fer avec une faible contamination en phosphore pour une partie et d'identifier une voie de valorisation à forte valeur ajoutée pour l'autre fraction minérale.

Des essais industriels en vraie grandeur sont actuellement en cours pour préciser la réalité «sur le terrain» de ces résultats de laboratoire.

J. POIRIER, G. THEVENIN, C. DUEE, C. BOURGEL
CEMHTI, CNRS UPR3079/Université d'Orléans

M. GAUTIER
INSA de Lyon

D. POIRIER
ArcelorMittal Maizières, Research and Development

Contexte

La conversion de la fonte en acier consiste en des réactions d'oxydation provoquées par la mise en contact de l'oxygène gazeux avec le métal liquide. Les oxydes produits associés aux autres oxydes constituant la charge du convertisseur, en particulier la chaux, contribuent à la formation d'un laitier liquide.

Le laitier d'aciérie de conversion (LAC), est, en quantité, le second coproduit issu du processus sidérurgique, avec une production d'environ 110 kg par tonne d'acier. A la suite de la transformation de la fonte en acier au sein du convertisseur, le laitier est en général versé dans de larges fosses où il est refroidi de façon contrôlée par arrosage d'eau.

Actuellement, après le déroctage et un premier tri, le laitier solidifié est transporté jusqu'aux installations de criblage pour l'obtention de produits granulaires calibrés, typiquement valorisés dans le génie civil comme granulats destinés aux remblais et routes non recouvertes du fait de l'instabilité volumique potentielle de ces laitiers. Les particules métalliques accessoirement générées lors de ce traitement sont récupérées et restituées à l'aciérie pour recyclage.

Cependant, le LAC brut contient toujours des matières de valeur pour le processus sidérurgique lui-même. En Europe, le laitier de convertisseur brut, non traité, contient en moyenne de 15 à 25 % m/m de fer élémentaire, réparti entre fer métallique (1-5 % m/m), FeO (60-70 % m/m) et Fe₂O₃ (25-30 % m/m). Il contient également de 40 à 60 % m/m de chaux, essentiellement combinée à des silicates et donc non carbonatée mais également sous la forme de chaux libre (quelques pourcents).

La réutilisation du LAC comme matière première pour la production d'acier entraînerait donc des économies de minerai de fer et de calcaire, utilisé comme ajusteur de composition pour le laitier de haut-fourneau (HF), ainsi qu'une diminution de l'énergie néces-

saire et de l'empreinte CO₂ du processus. Cependant, un des principaux rôles du laitier de convertisseur dans l'élaboration de l'acier est l'extraction du phosphore contenu dans la fonte. Dans le cas d'un recyclage direct dans le process sidérurgique, le phosphore extrait au niveau du convertisseur serait alors réinjecté dans le haut-fourneau, limitant ainsi actuellement fortement l'intérêt de cette pratique, en particulier dans le cadre de productions privilégiant les aciers à ultra-basse teneur en phosphore.

Le contexte actuel de forte tension sur les matières premières (disponibilité, qualité, prix) entraîne le besoin de rechercher toute source alternative. Les gisements de laitiers de convertisseurs représentent potentiellement des millions de tonnes sur le territoire européen, immédiatement accessibles aux usines, et la production annuelle nominale est comprise entre 1,0 et 1,2 Mt en France (*source www.ctpl.info*).

Jusqu'à présent, aucune méthode de recyclage systématique du LAC dans la filière sidérurgique n'a été mise au point. La proportion de phosphore dans le laitier rend cette pratique dépendante de paramètres locaux tels que l'approvisionnement en minerais plus ou moins riches en phosphore, ou les nuances d'acier produites. Par conséquent, le taux de recyclage varie en Europe entre 0 et 40 %, le laitier devant alors être valorisé dans des marchés hors sidérurgie. L'accès à ces marchés est très dépendant des conditions locales, notamment du fait de la faible valeur ajoutée du laitier et des coûts de transport liés à sa masse volumique. De nombreux projets de recherches dans le monde entier ont étudié de nouvelles voies de valorisation pour le LAC mais dans la plupart des cas, la valeur du fer est perdue, voire même diminuée la valeur des autres minéraux présents.

Objectifs

Ces travaux s'inscrivent dans le cadre des programmes de recherche ORLA puis LAC-TER, dont l'objectif est de concevoir une nouvelle filière de traitement et de séparation des principaux composants du laitier de convertisseur :

- les phases minérales porteuses de fer et de calcium (FeO , $n\text{CaO} \cdot n\text{FeO} \cdot n\text{Fe}_2\text{O}_3$)
- les phases porteuses de silice, calcium ($n\text{SiO}_2 \cdot n\text{CaO}$, CaO) mais aussi de phosphore,

garantissant la récupération systématique de la valeur fer (et si possible de la valeur chaux) du laitier sans contamination par le phosphore.

Les objectifs visés sont de garantir :

- la récupération systématique de la valeur fer (et si possible de la valeur chaux) du laitier.
- pour l'autre fraction produite au moins une voie de valorisation à forte valeur ajoutée.

Les freins techniques concernent notamment la présence de phosphore plus ou moins indésirable ainsi que la faible taille des cristaux. L'imbrication des phases minérales ne permettant pas un broyage sélectif ni une séparation magnétique optimisée.

Pour résoudre ces difficultés, le chemin de cristallisation du laitier d'aciérie de conversion devrait être autant que possible, plus finement contrôlé dans le but d'obtenir des minéraux purs dont les tailles sont plus favorables aux processus de broyage et de séparation. L'extraction du phosphore dans les phases minérales porteuses de fer sera réalisée à partir de constatations minéralogiques ; la caractérisation des LAC montre que les minéraux riches en fer (ferrites de calcium) et les minéraux riches en phosphore (silicates de calcium) sont clairement distincts.

Le broyage n'est alors pas envisagé comme une simple méthode de réduction granulométrique, mais aussi comme un moyen de dissocier des phases minérales pures

porteuses d'une part de fer et de calcium, et d'autre part porteuses de silice, de calcium et de phosphore.

Pour atteindre ces objectifs, des recherches en laboratoire sont nécessaires. Elles couplent des techniques de caractérisation haute température et des calculs thermodynamiques, permettant ainsi d'étudier l'influence des traitements thermiques et des conditions de refroidissement sur les propriétés thermochimiques des laitiers. La minéralogie (nature, cristallisation et pureté des phases), la réactivité et la microstructure à différentes échelles, du macroscopique au microscopique et jusqu'à la localisation atomique pour le phosphore ont notamment été caractérisées.

Caractérisation microstructurale et minérale des laitiers d'aciérie de conversion

Les échantillons de laitier sélectionnés pour cette étude sont représentatifs de la production annuelle de l'usine sidérurgique ARCELORMITTAL de Fos-sur-Mer. Après démetalisation (élimination des parties métalliques), le laitier est broyé et homogénéisé. La granulométrie obtenue est 75 % m/m < 160 μm et 96 % m/m < 630 μm .

Le laitier est principalement composé de CaO , SiO_2 , Fe_xO_y , et MgO (environ 80% m/m du total), et contient de petites quantités de MnO , P_2O_5 , Al_2O_3 and TiO_2 (tableau 1).

Tableau 1

Composition chimique (m/m) représentative d'un laitier d'aciérie de conversion

CAO	FE _{TOT}	SiO ₂	MGO	AL ₂ O ₃	MNO	P ₂ O ₅	TiO ₂	CR ₂ O ₃	PERTE AU FEU
43.43	19,26	11.35	6.64	2.9	2.84	1.46	0.48	0.11	3.01

La microstructure de ce laitier est présentée à la figure 1.

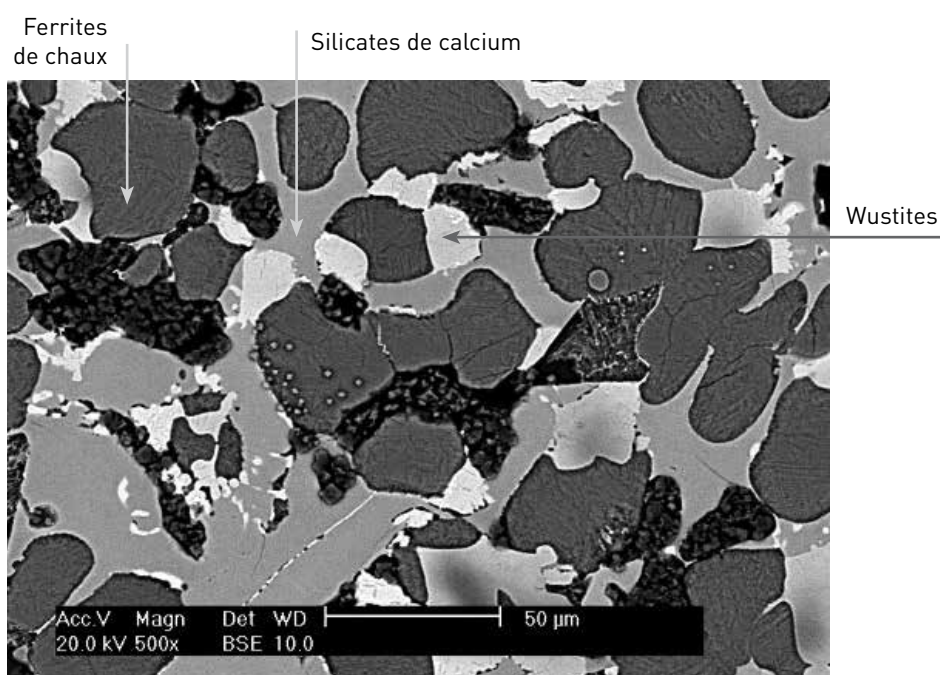


Figure 1

Microstructure d'un laitier industriel d'aciérie de conversion
(Microscopie Electronique à Balayage- mode électrons rétrodiffusés)

La taille des cristaux varie de quelques micromètres à 50 micromètres. Les phases minérales principales sont :

- des silicates de calcium ayant une teneur en phosphore variable entre 3 et 8 % m/m (gris clair),
- des ferrites de chaux associées à de l'alumine (gris foncé),
- des wustites (FeO) contenant de la magnésie et de l'oxyde de manganèse (blanc).

Des phases minérales en plus faible quantité telles que la chaux libre (CaO) et le périclase (MgO) sont également détectées par diffraction des rayons X.

La microstructure des laitiers d'aciérie de conversion indique que la taille des cristaux est insuffisante pour séparer les différents minéraux en vue de leur valorisation. Des tests expérimentaux l'ont confirmé, notamment par séparation magnétique, expérimentée sans succès.

Effet du refroidissement des laitiers sur la cristallisation et la pureté des phases

L'étude des transformations thermochimiques, associant des changements de phases aux évolutions microstructurales, qui se produisent dans les laitiers depuis la température de fin de conversion (environ 1650°C) jusqu'au refroidissement à la température ambiante est un point clé pour le traitement des laitiers d'aciérie en vue de leur valorisation/recyclage.

Le caractère original de la démarche proposée tient principalement à l'instrumentation et la caractérisation à haute température.

Un couplage de techniques de caractérisation haute température et de calculs thermodynamiques a permis au laboratoire CEMHTI/CNRS d'Orléans d'étudier le refroidissement contrôlé des laitiers, en termes de nature, de cristallisation et de pureté des phases minéralogiques.

Il s'agit de déterminer l'influence des traitements thermiques et des conditions de refroidissement sur la typologie des laitiers, afin de proposer des pratiques industrielles adaptées et optimales.

L'originalité de la démarche est d'associer une approche thermodynamique (prédiction des phases cristallines) à une approche cinétique (effet du temps et de la température sur la microstructure).

Trois types de refroidissement ont été étudiés et comparés.

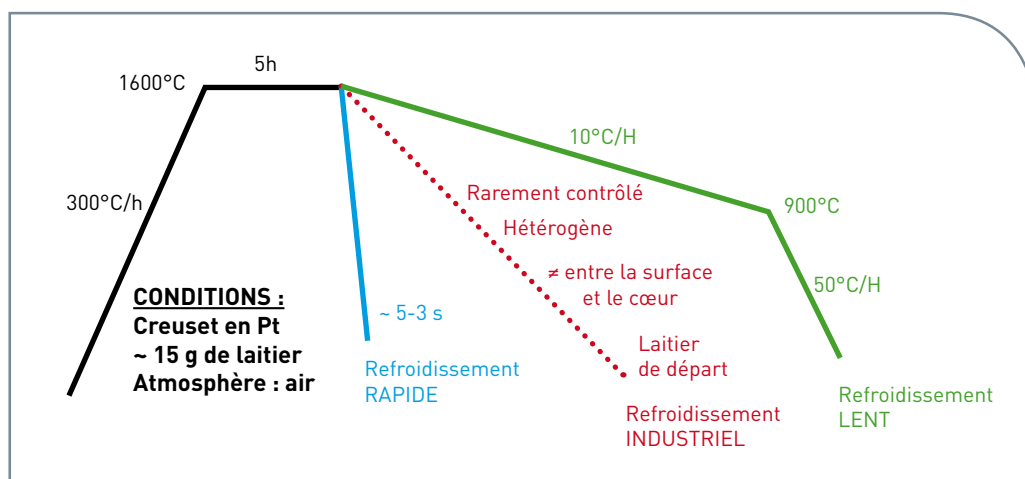
- un refroidissement appelé «industriel» qui correspond au laitier à usage de granulat refroidi en fosse et qui n'a pas subi d'autre traitement thermique après prélèvement,
- deux refroidissements effectués en laboratoire selon un protocole décrit dans le tableau 2 et à la figure 2.

Tableau 2

Conditions de refroidissement de chacun des échantillons étudiés

	REFROIDISSEMENT (TRÈS) RAPIDE (laboratoire)	REFROIDISSEMENT INDUSTRIEL (sur site)	REFROIDISSEMENT LENT (laboratoire)
Temps de refroidissement	3 - 5 secondes	~ 24 à 48h (estimation)	~ 72h
Remarques	Trempe à l'eau	Echantillon de départ	Proche de l'équilibre thermodynamique

Figure 2
Protocoles de refroidissement utilisés pour les trois échantillons



Les conditions de refroidissement ont un effet important sur la taille des cristaux et la pureté des phases minérales (figure 3).

- **Un refroidissement très rapide** (trempe) favorise la formation de cristaux de silicates tricalciques Ca_3SiO_5 (ou C3S), sous forme de dendrites de 3 à 10 μm ou de petits bâtonnets ne dépassant pas 80 μm , présents dans une matrice riche en fer et calcium.

- **Un refroidissement dans les conditions industrielles** conduira à une situation intermédiaire entre la trempe et le refroidissement lent, avec des cristaux, relativement hétérogènes et multiphasés, variant de 50 à 150 μm . Ce refroidissement est actuellement employé pour l'élaboration de laitier à destination du BTP.

- **Un refroidissement lent** (de l'ordre de 72h), proche des conditions d'équilibre thermodynamique, favorise la formation de cristaux primaires de silicates bicalciques (Ca_2SiO_4), homogènes, purs et de grande dimension (180 à 250 μm).

L'identification des phases minérales du laitier en fonction des conditions de refroidissement a été réalisée par diffraction des Rayons X (Figure 4)

- Le laitier refroidi très rapidement (trempé) comporte principalement du silicate de calcium sous forme Ca_3SiO_5 (tricalcique), du périclase (MgO) et une petite quantité de chaux (CaO). Des ferrites de calcium sont également présentes, se rapprochant de la stœchiométrie idéale $\text{Ca}_2\text{Fe}_2\text{O}_5$. Cependant l'analyse du diffractogramme a permis de montrer que des substitutions de Fe par Mn, Mg, Si ou Al peuvent intervenir.

- Le laitier «industriel» actuellement élaboré pour un usage comme granulats présente de nombreuses phases : de la chaux (CaO), des silicates de calcium (bicalcique, Ca_2SiO_4), de la wustite (FeO) contenant MgO , des ferrites de calcium de type srebrodolskite ($\text{Ca}_2\text{Fe}_2\text{O}_5$) et un peu de périclase (MgO). Les silicates de calcium sont principalement sous forme de larnite ($\beta\text{-Ca}_2\text{SiO}_4$), même si un peu de silicates tricalciques (Ca_3SiO_5) est également mis en évidence.

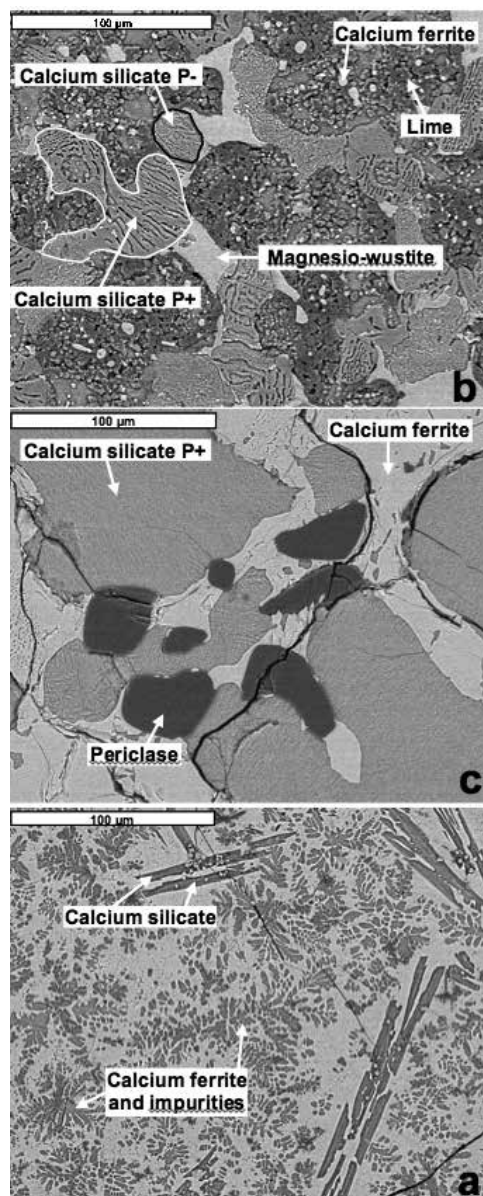


Figure 3

Influence des conditions de refroidissement sur la microstructure des laitiers (a) refroidissement rapide (b) laitier industriel, (c) refroidissement lent, Micrographies obtenues au Microscope Electronique à Balayage

- Le laitier refroidi plus lentement présente sensiblement les mêmes phases : de la chaux, des silicates de calcium, essentiellement sous forme de larnite, des ferrites de type srebrodolskite très proches de la stœchiométrie $\text{Ca}_2\text{Fe}_2\text{O}_5$, avec quelques substitutions ponctuelles du Fe par du Mg et du Si pouvant être envisagées. Du périclase et des oxydes de manganèse sous forme $\text{Mn}_{2.03}\text{O}_4$ sont également identifiés sur le diffractogramme.

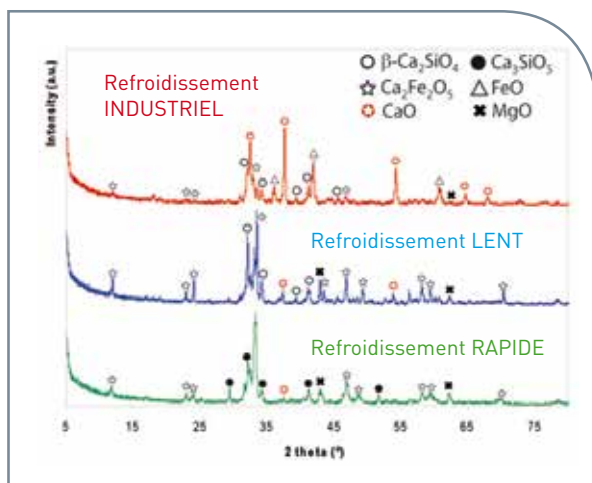


Figure 4

Diffractogramme du laitier en fonction des trois types de refroidissement : rapide, industriel et lent

La modélisation thermodynamique (figure 5) effectuée avec le logiciel Factsage permet de prédire les phases minérales formées à l'équilibre. Les prédictions théoriques sont en accord avec les résultats expérimentaux précédents pour le refroidissement lent.

La phase primaire de cristallisation est constituée de silicates tricalciques (Ca_3SiO_5), porteurs du phosphore, et qui se décomposent à partir de 1300°C en CaO et Ca_2SiO_4 .

Les ferrites de calcium ($\text{Ca}_2\text{Fe}_2\text{O}_5$), associées aux autres impuretés présentes dans les laitiers, sont les dernières phases à cristalliser en dessous de 1050°C.

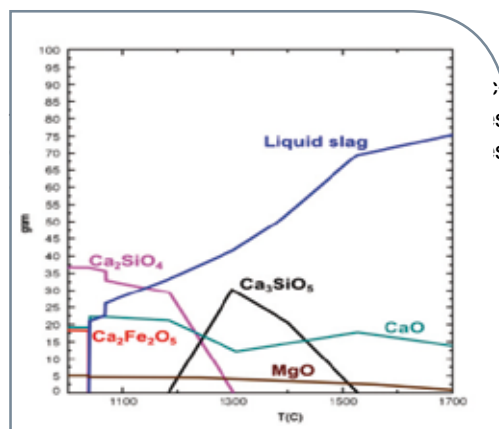


Figure 5

Prédiction thermodynamique des phases minérales des laitiers en fonction de la température

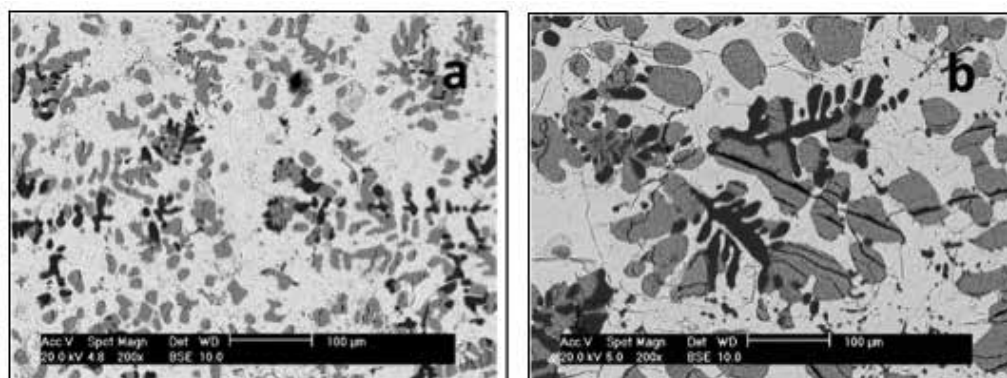
Optimisation du chemin de cristallisation des laitiers d'aciérie de conversion

Les conditions de refroidissement ont une influence significative sur la taille des cristaux, la proportion des phases minérales et leur pureté. L'optimisation des chemins de cristallisation des laitiers d'aciérie de conversion a été étudiée à l'échelle du laboratoire. Du laitier (8g) est introduit dans un creuset en platine. Après 5 heures à 1600°C, un refroidissement contrôlé est effectué de 1600°C à la température ambiante. Les microstructures du laitier après refroidissement sont observées au microscope électronique à balayage (FEGSEM).

Différent paramètres ont été étudiés :

- la vitesse de refroidissement du laitier : 10°C/mn et 1°C/mn,
- la température (1200, 1300 ou 1400°C) et la durée de maintien (5 ou 24 heures) du plateau de cristallisation, /
- l'ajout de silice dans le laitier : 0 ou 5 % m/m.

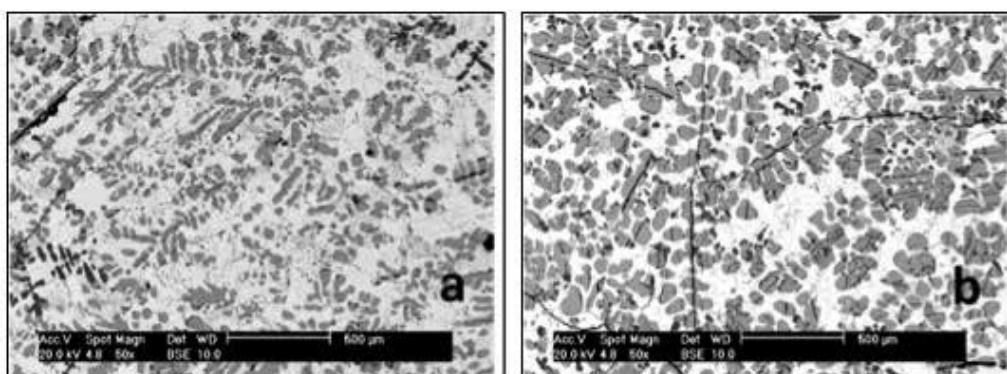
Les figures 6, 7 et 8 montrent les microstructures typiques de laitier obtenues selon les différents chemins de cristallisation imposés au laitier



a) Vitesse de refroidissement 10°C/mn

b) Vitesse de refroidissement 1°C/mn

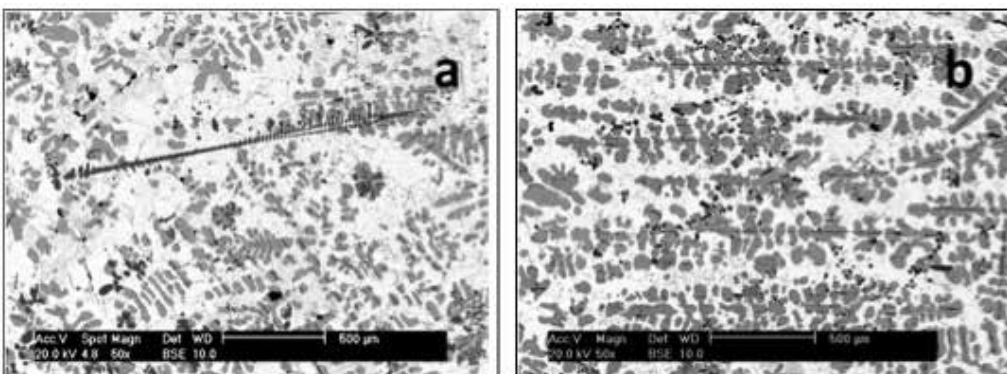
Figure 6
Effet de la vitesse de refroidissement (Plateau de cristallisation : 1h à 1200°C)



a) Maintien du plateau 5h

b) Maintien du plateau 24h

Figure 7
Effet de la durée de maintien du plateau de cristallisation (Température du plateau : 1300°C, vitesse de refroidissement : 1°C/mn)



a) Ajout de silice 0 % m/m

b) Ajout de silice 5% m/m

Figure 8
Effet de l'ajout de silice dans le laitier (Plateau de cristallisation : 5h à 1300°C, vitesse de refroidissement : 1°C/mn)

La température du plateau de cristallisation (1200°C, 1300°C ou 1400°C) n'a pas d'effet réel sur la microstructure. En revanche, une faible vitesse de refroidissement (1°C/mn), une durée de maintien plus longue du plateau de cristallisation (24 heures), ou encore l'ajout de silice (5 % m/m) favorisent la cristallisation de phases minéralogiques de taille plus importante, comme les silicates de calcium.

Ainsi, on a pu montrer en laboratoire qu'un refroidissement contrôlé permet :

- une distribution sélective de deux familles de minéraux : les phases de silicates de calcium (associées au phosphore), et les phases minérales porteuses de fer et de calcium (ferrites),
- une croissance plus importante des cristaux,
- une amélioration de la pureté de chacune des phases minérales générées.

Une vitesse de refroidissement de 1°C/mn, avec un plateau intermédiaire de cristallisation à 1400°C pendant 5 heures¹ et un ajout de silice (SiO₂) de 5 % m/m dans le laitier en fusion favorise une microstructure optimale avec un grossissement d'un facteur 2,5 des phases de silicates de calcium. La taille moyenne des cristaux de silicates de calcium est alors supérieure à 100 µm.

Spéciation du phosphore dans les silicates de calcium

Le phosphore présente une remarquable ségrégation microstructurale dans le laitier, et est présent uniquement dans une solution solide [3CaO.P₂O₅-2CaO.SiO₂]. Les phases porteuses du fer ne contiennent pas de phosphore.

Cependant, les teneurs en phosphore dans les silicates de calcium sont différentes selon la nature des silicates, et par conséquent des conditions de refroidissement. La teneur en phosphore dans les silicates tricalciques (Ca₃SiO₅ ou C3S) reste limitée (faible teneur en P₂O₅), typiques de condi-

tions de refroidissement (très) rapide. Lorsqu'on converge vers des conditions de refroidissement typiques des conditions de génération du laitier sur site industriel, les silicates de calcium issus de la décomposition des C3S prédominent. Enfin, lors d'un refroidissement lent, contrôlé, et proche de l'équilibre thermodynamique, la formation de Ca₂SiO₄ (ou C2S) primaires est favorisée, ainsi qu'une teneur en phosphore plus élevée.

L'étude structurale multi-échelles de l'environnement atomique du phosphore dans les silicates de calcium de permet en particulier de mieux comprendre la réactivité chimique du phosphore lors des réactions d'hydratation des silicates calciques².

Plusieurs techniques analytiques cristallographiques (diffraction des rayons X ou DRX, microscope électronique en transmission ou MET, et résonance magnétique nucléaire haute résolution du solide ou RMN du ²⁹Si et du ³¹P) ont été couplées pour caractériser différents silicates de calcium Ca₂SiO₄ dopés à différentes teneurs en phosphore (noté C2S5P pour 5 % m/m de P₂O₅ et C2S10P pour 10 % m/m de P₂O₅) synthétisés en laboratoire.

Ces différents composés sont soumis à trois types de refroidissement :

- trempe à l'eau (refroidissement très rapide),
- refroidissement contrôlé à une vitesse de 2°C/mn,
- et refroidissement contrôlé à une vitesse de 10°C/h proche de l'équilibre thermodynamique).

Les résultats du couplage de ces techniques microstructurales permettent ainsi de proposer un schéma global, indiquant clairement que lors de l'ajout de phosphore (P) aux silicates bicalciques (C2S), des groupements phosphates [PO₄]³⁻ s'insèrent dans la structure minéralogique de Ca₂SiO₄ en substituant les groupements silicates [SiO₄]⁴⁻, ce qui correspond à la formation d'une solution solide sans modification de l'architecture globale. Le motif structural de base se retrouve dans plusieurs composés de ce système binaire, avec des cations Ca²⁺ entourés par 6 tétraèdres SiO₄ ou PO₄ (Figure 9).

¹ - Pour des raisons pratiques, la durée de maintien du plateau est conservée à 5 heures, dans la mesure où l'application d'une durée de maintien de 24 heures ne serait pas transposable à l'échelle industrielle.

² - le P est connu pour être un retardateur de prise cimentaire perturbant la formation des silicates de calcium hydratés (ou C-S-H).

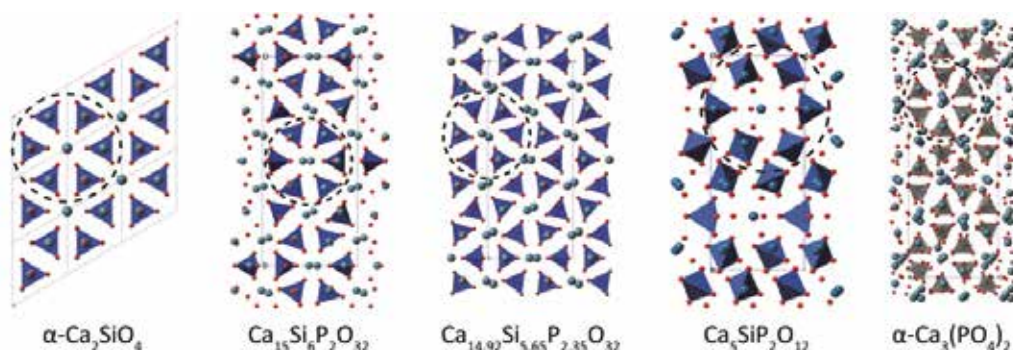
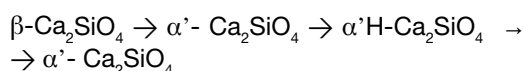


Figure 9
Structure cristalline de plusieurs composés de formule $\text{Ca}_{2-(x/2)}\text{Si}_{1-x}\text{P}_x\text{O}_4$
(Les cercles définissent le motif structural commun aux 5 composés)

L'étude de la spéciation du phosphore dans les silicates de calcium a permis d'identifier précisément sa forme cristalochimique (pas de liaison P-O-P ou P-O-Si), le phosphore étant toujours associé au calcium. Elle a également permis d'expliquer le rôle du phosphore au sein de la structure des silicates de calcium, sa présence stabilisant ces derniers.

En fonction du refroidissement, l'évolution polymorphique des silicates de calcium est :



Conclusion

L'étude des processus de cristallisation des laitiers d'aciérie de conversion (LAC) à haute température a démontré que les phases minérales riches en fer (ferrites de calcium) et celles riches en silice (silicates de calcium associés au phosphore) sont clairement distinctes. Des conditions de refroidissement finement contrôlées peuvent permettre la cristallisation de minéraux purs et de grande taille ($> 100 \mu\text{m}$), condition nécessaire pour la mise en œuvre de techniques de séparation à forte sélectivité des minéraux, offrant ainsi des perspectives intéressantes pour le recyclage et la valorisation des laitiers d'aciérie de conversion (LAC).

L'objectif industriel est que les phases minérales riches en fer et dépourvues de phosphore puissent être recyclées au niveau du process sidérurgique. Les phases minérales riches en silicium, calcium et phosphore pourront trouver des voies de valorisation externes au process sidérurgique, comme par exemple la fabrication d'amendement sidérurgiques basiques (basicité, richesse en Ca et en phosphates), ou encore la fabrication de matériaux granulaires pour le génie civil (limitation de la richesse en chaux libre).

Des essais industriels en vraie grandeur menés par le groupe ArcelorMittal sont actuellement en cours pour préciser la réalité «sur le terrain» de ces résultats de laboratoire. Les premiers retours semblent confirmer les conclusions des recherches entreprises en laboratoire. Des conditions de refroidissement contrôlées à l'échelle industrielle favorisent la cristallisation et une distribution sélective des phases minéralogiques (silicates de calcium associés au phosphore et ferrites de calcium). Une amélioration de la pureté de chacune des phases minérales est également observée.

Remerciements

Les auteurs remercient l'ANR et le FIU pour leurs soutiens financiers dans le cadre des projets de recherche ORLA et LACTER (2008-2014)

Références

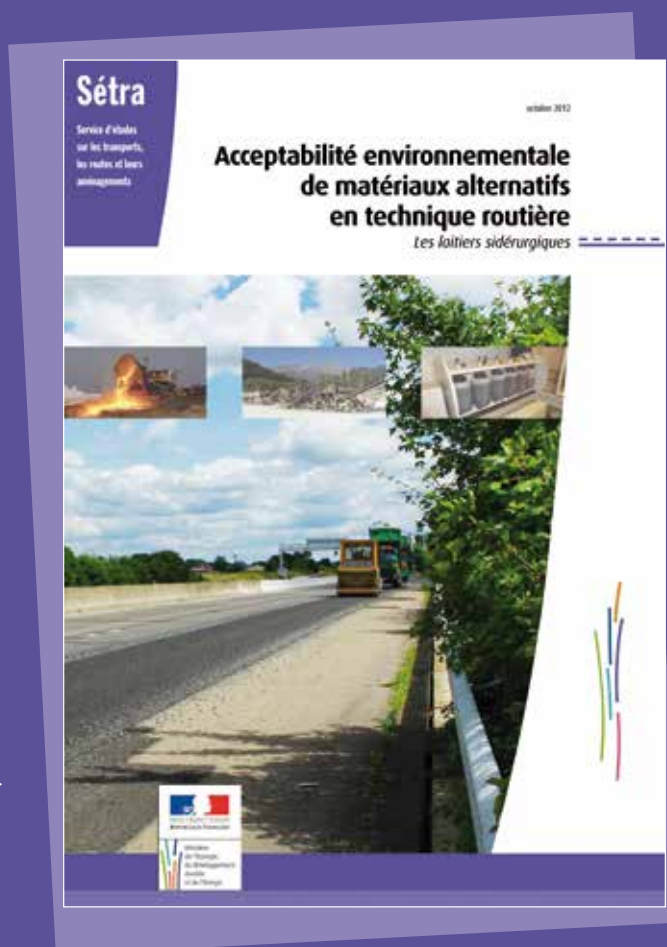
1. D. Durinck, P.T. Jones, B. Blanpain, P. Wollants, Air-cooling of Metallurgical Slags Containing Multivalent Oxides, J. Am. Ceram. Soc. 91 (2008) 3342-3348.
2. M. Tossavainen, F. Engstrom, Q. Yang, N. Menad, M. Lidstrom Larsson, B. Bjorkman, Characteristics of steel slag under different cooling conditions, Waste Manage. 27 (2007) 1335-1344.
3. Gautier, M., Poirier, J., Bodéan, F., Franceschini, G., Véron, E International Journal of Mineral Processing 123, 94-101, 2013
4. Mumme, W.G.H., R.J.; Bushnell-Wye, G.; Segnit, E.R. Rietveld Neues Jahrbuch fuer Mineralogie - Abhandlungen 169, 35-68, 1995
5. Rubio, V., de la Casa-Lillo, M.A., De Aza, S., De Aza, P.N. Journal of the American Ceramic Society 94, 4459-4462, 2011
6. Martínez, I.M., Velásquez, P., De Aza, P.N. Journal of the American Ceramic Society 95, 1112-1117, 2012.

PRESCRIRE DES LAITIERS SIDÉRURGiques, UNE ACTION ÉCO-CITOYENNE

Agissons ensemble pour l'environnement !

Des performances techniques recherchées et reconnues...

- Respect de la norme produit granulats NF EN 18-545
- Caractéristiques mécaniques constantes et homogènes
- Performances géotechniques «haut de gamme»
- Coût de production très compétitif
- Une densité élevée pour les usages en pré-chargement ou pour les enrochements.



Dans le respect du développement durable !

La conformité aux exigences du guide SETRA garantissent

- La préservation accrue des ressources minérales naturelles
- Un impact environnemental minimal, maîtrisé et encadré
- La limitation de la mise en stockage et des emprises au sol
- La minimisation des coûts de transport et des nuisances associées par la valorisation de ressources locales.

Pour plus d'information, consultez-nous.
ou visitez notre site internet :
www.ctpl.info

**CTPL, un organisme dédié à la valorisation
des laitiers sidérurgiques**

CTPL

CENTRE TECHNIQUE
ET DE PROMOTION
DES LAITIERS SIDÉRURGiques

Que sont devenus les laitiers en 2013 ?



Comme chaque année et pour la neuvième année consécutive, le Centre Technique et de Promotion des Laitiers sidérurgiques (CTPL) a lancé en 2013 l'enquête nationale relative aux flux de laitiers sidérurgiques produits sur le territoire national, en collaboration avec la Fédération Française de l'Acier (F.F.A.). 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 légère¹ amélioration globale pour la production annuelle des laitiers. Depuis la crise économique qui a touché très durement l'industrie sidérurgique à partir d'octobre 2008 et sur toute l'année 2009, les niveaux de production s'établissent ces quatre dernières années entre 4,8 et 5,1 millions de tonnes pour l'année 2013, année «record» depuis 2008, mais toujours 20 % en deçà des niveaux connus avant la crise.

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

Compte tenu des filières habituelles de valorisation des laitiers (bâtiment pour les liants hydrauliques, et travaux publics pour les granulats), les quantités de laitier utilisées marquent une baisse significative, affectées par la baisse drastique du marché de la construction. Ceci est particulièrement vrai pour les laitiers de haut-fourneau, majoritairement granulés pour la production de liants hydrauliques (ciments, additions pour les bétons, liants hydrauliques routiers, ...). L'absence de mise en chantier de gros projets consommateurs de granulats a également affecté l'utilisation des laitiers d'aciérie.

Tableau 1

Synthèse des productions de laitiers (en kT)

TYPE DE LAITIERS		2008	2009	2010	2011	2012	2013
LHF	LHF totaux	3 639	2 329	3 079	2 847	2 866	3 081
	LHF granulés	2 814	1 772	2 442	2 323	1 902	2 127
	LHF cristallisés	825	557	637	524	964	954
Laitiers d'aciérie de conversion		1 235	807	1 069	1 136	1 135	1 258
Laitiers d'aciérie électrique (acières carbone)		578	575	579	617	637	516
Laitiers d'aciérie électrique (acières inox et alliés spéciaux)		348	131	200	231	216	206
Total		5 800	3 842	4 929	4 831	4 855	5 061

Laitiers de haut fourneau

La production de laitiers de haut-fourneau s'établit pour l'année 2013 à un peu plus de 3 millions de tonnes, issues des sites Arcelor-mittal de Fos-sur-Mer et Dunkerque², ainsi que du site Saint-Gobain de Pont-à-Mousson. Le ratio entre la partie cristallisée (1/3) et celle granulée (2/3) est globalement respecté, en attente du démarrage (juin 2014) de la seconde installation de granulation sur les haut-fourneaux de Fos, qui devrait en 2014 augmenter la part de laitiers de haut-fourneau granulés mis sur le marché.

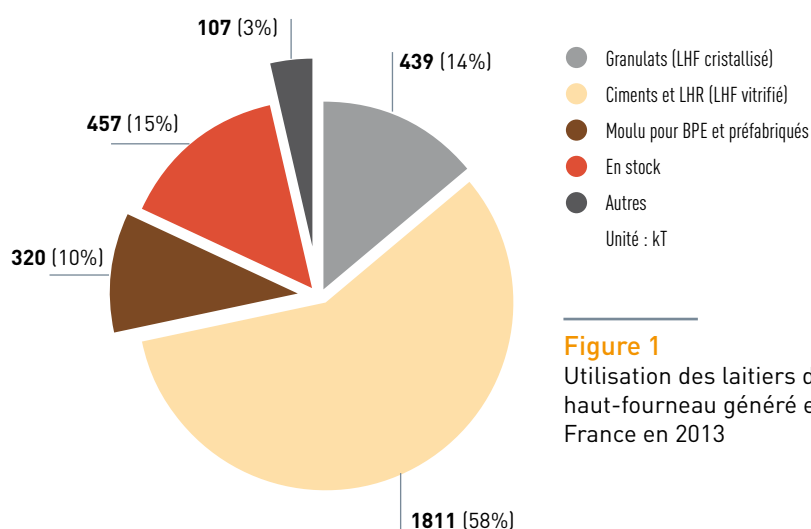


Figure 1

Utilisation des laitiers de haut-fourneau généré en France en 2013

(1) Cette amélioration peut être considérée comme réelle, dans la mesure où elle ne prend pas en compte l'arrêt accidentel de la production de l'aciérie de CELSA France (Boucau) pendant 5 mois, équivalent à environ 60 kt de laitier EAF carbone non produits par le site.

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

La figure 1 montre qu'une majorité des tonnages produits (68%) sont valorisés sous forme de laitier vitrifié comme liants hydrauliques par l'industrie cimentière à destination de la construction de bâtiments et d'ouvrages (ciments et additions du béton) et, de façon plus marginale, de la technique routière (liant hydraulique routier); ceci correspond à la fraction vitrifiée (2/3) des laitiers de haut-fourneau.

Seuls 14% des laitiers cristallisés (des 33% de la production totale des LHF) ont été valorisés comme granulats en technique routière. D'autres filières d'utilisation du laitier de haut fourneau cristallisé, encore marginales (3%), tendent à se développer, par exemple pour la fabrication de laine de roche. 15% des flux (essentiellement des laitiers cristallisés non absorbés par l'industrie des granulats) n'ont pas été valorisés au cours de l'année, mais restent en attente de conditions de marché locales plus favorables autour des sites. Ces conditions restent d'ailleurs encore favorables dans l'est de la France, où près de 850 kt de laitiers de haut-fourneau cristallisés issus de crassiers historiques ont été valorisés et déstockés.

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 2 millions de tonnes pour l'exercice 2013. Parmi les laitiers d'aciérie, on peut distinguer trois grandes familles :

Les laitiers de convertisseur

Les laitiers de convertisseur à oxygène (appelés aussi laitiers LD), issus de la filière fonte représentent 62% des tonnages de laitiers d'aciérie produits en 2013 (environ 1,25 million de tonnes). Près de la moitié des flux produits (43 %) trouvent des filières de valorisation : pour 27% des tonnages produits, ces laitiers ont été utilisés en technique routière comme granulats ou comme constituant de liants hydrauliques routiers, 13% en recyclage interne au niveau des sites sidérurgiques, et 3% vers d'autres filières, encore marginales (amendements agricole, ...) mais économiquement intéressantes.

Un peu plus de la moitié des tonnages (57%) n'ont pas trouvé de débouchés en 2013, compte tenu essentiellement de conditions locales de marché difficiles, mais aussi de renégociations de certains contrats avec les co-traitants. L'année 2014 devrait être plus propice à la valorisation de ces flux.

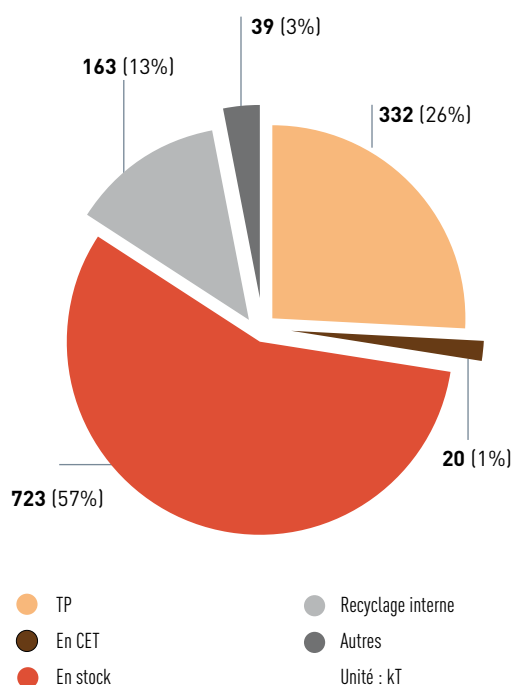


Figure 2

Orientation des laitiers de convertisseur générés en France en 2013

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

Ils représentent 28 % des tonnages de laitiers d'aciérie produits en 2013, soit un peu plus de 0,56 million de tonnes. On peut constater un différentiel significatif de la production de ces flux par rapport aux années précédentes (cf. tableau 1). Ceci est lié à la sous-production du site CELSA France de Boucau suite à un accident (incendie) qui a immobilisé ses installations pendant près de 5 mois.

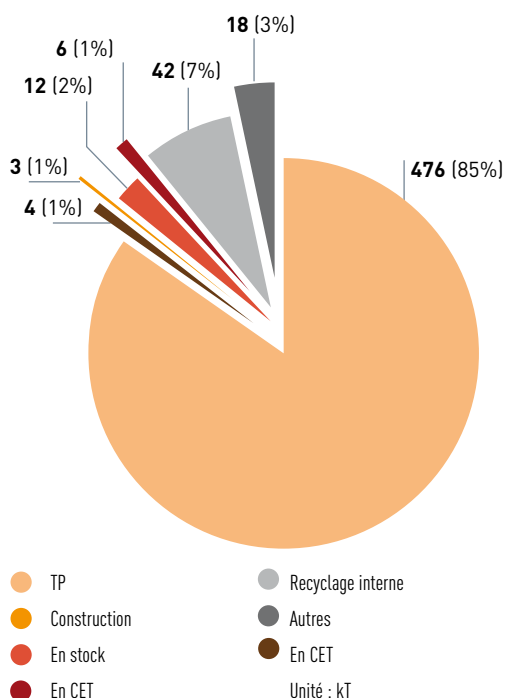


Figure 3

Utilisation des laitiers d'aciérie électrique issus de la filière carbone en 2013

Compte tenu des propriétés intrinsèques de ces laitiers, l'essentiel des tonnages (85%) est utilisé comme granulats en technique routière. Seule une très faible proportion part encore vers le stockage temporaire (2%), en attente de débouchés et de conditions locales de marché plus favorables.

La mise en stockage réglementé ou l'orientation vers d'autres filières restent

anecdotiques et ponctuelles (5%). En 2013, des efforts ont également été réalisés au niveau des sites en termes de recyclage interne des laitiers, passant de 1% en 2012 à 7% en 2013 ; c'est en particulier le cas des sites du groupe RIVA et de LME.

Les laitiers d'aciérie électrique issus de la filière aciers inoxydables et alliés

Ils représentent en 2013 10% des tonnages produits sur le territoire, soit environ 0,2 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 :

- 73% sont utilisés en techniques routières,
- 11% en traitement de récupération des fractions métalliques et oxydes des laitiers,
- 16% vont en stockage interne en attente de débouchés.

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

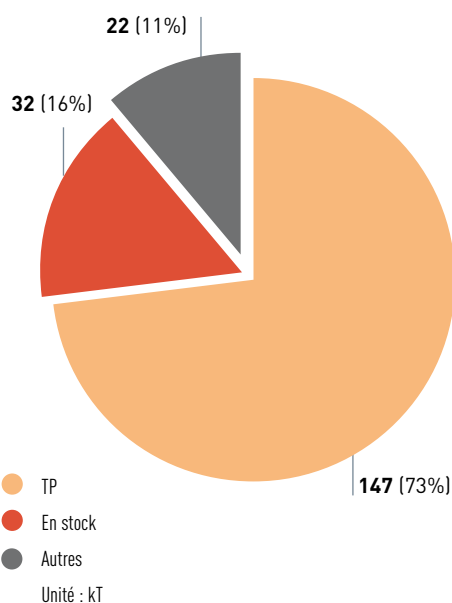


Figure 4

Utilisation des laitiers d'aciérie électrique issus de la filière inox et alliés spéciaux en 2013

Gestion des stocks historiques

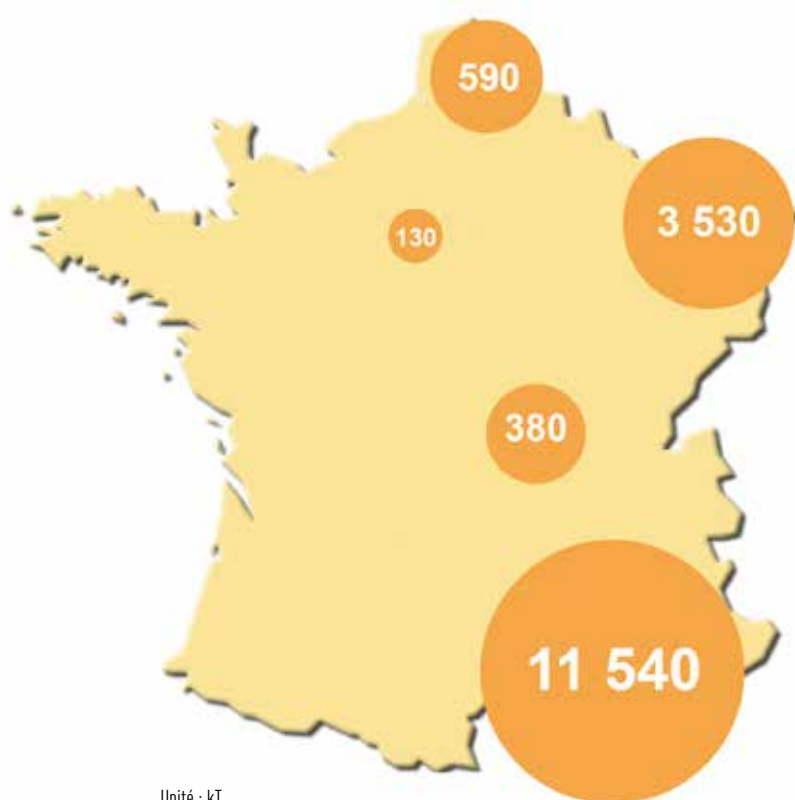
A la fin de l'année 2013, les stocks de laitiers recensés restent encore importants à l'échelle du territoire (près de 40 millions de tonnes), en particulier pour les laitiers de haut-fourneau cristallisés issus du passé (XIX^{ème} et XX^{ème} siècles - environ 25 millions de tonnes), ou encore les laitiers de convertisseur issus de la filière fonte (environ 16 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 < 0,8 million de tonnes).

Cependant, compte tenu des besoins locaux, plusieurs initiatives sont actuellement en cours sur différents sites sidérurgiques pour l'exploitation de ces stocks historiques. D'ores et déjà, c'est près d'un million de tonnes de ces stocks historiques 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.

Rendez-vous aux adresses suivantes :

- <http://www.ctpl.info/wp-content/uploads/2014/09/CTPL-laitiers-HF-2013-2012.pdf>
- <http://www.ctpl.info/wp-content/uploads/2014/09/CTPL-laitiers-acierie-2013-2012.pdf>



Unité : kT

Figure 5

Répartition géographique des stocks de laitiers d'aciérie sur le territoire

Afin de poursuivre ses efforts dans le domaine du développement durable, le CTPL a décidé que la Revue Laitiers Sidérurgiques ne sera dorénavant disponible que sous format PDF téléchargeable depuis le site internet du CTPL.

LES GAINS :

- l'énergie et le CO₂ générés lors de l'acheminement des exemplaires papier,
- le papier ainsi que l'enveloppe pour son envoi,
- la suppression de la pollution liée à l'emploi des encres d'imprimerie.



NOUVEAU

Téléchargez le prochain numéro sur notre site www.ctpl.info

Nous vous donnons donc rendez-vous sur notre site **www.ctpl.info** dès le second trimestre 2013 afin de pouvoir télécharger votre numéro 101.

Des laitiers

à fort potentiel !



Près de 400 millions de tonnes de laitiers de haut-fourneau sont produites dans le monde chaque année. Ces laitiers, lorsque granulés, sont généralement utilisés en cimenterie ou en construction routière. Soucieux d'optimiser leur valorisation, Siemens Metals Technologies, en partenariat avec le site sidérurgique de Voestalpine Stahl en Autriche, a mené un projet de R&D visant à étudier une technologie de granulation à sec des laitiers de haut-fourneau. Utilisant de l'air pour le refroidissement des laitiers, cette technologie devrait permettre non seulement de réaliser de grosses économies d'eau, mais surtout de récupérer de la chaleur à échelle industrielle pour des applications en chauffage ou pour la génération d'énergie électrique. L'étude devait également vérifier que les laitiers ainsi granulés respectent bien les mêmes spécifications et critères que les LHF granulés par voie humide. Il ressort que le laitier de haut fourneau liquide représente une des plus importantes réserves d'énergie thermique pour l'industrie sidérurgique et que sa granulation à sec permet d'aboutir à un produit de première qualité, facile à utiliser par les cimentiers. Des atouts, tant pour le sidérurgiste que pour les cimentiers, qui ouvrent la voie à une valorisation à haute valeur ajoutée.

Ian J McDONALD, SIEMENS VAI métaux Technologies, Royaume Uni
Andrea WERNER, SIEMENS VAI métaux Technologies, Autriche

Introduction

Chaque année, c'est près de 400 millions de tonnes de laitiers de haut-fourneau qui sont produites dans le monde. Le laitier est généralement utilisé, granulé, en cimenterie comme un substitut pour le clinker, ou comme matériau granulaire en construction routière, lorsque cristallisé. Les pratiques actuelles de granulation reposent sur la trempe du laitier de haut-fourneau sous forme liquide au sein d'installations utilisant des quantités importantes d'eau. Toutefois, jusqu'à présent, il n'était pas possible de valoriser l'énergie issue de la chaleur du laitier en fusion et dégagée lors de la trempe de celui-ci. Cette énergie s'élève à environ 1,5 GJ d'énergie par tonne de laitier.

Un projet de R&D coordonné par Siemens Metals Technologies, avec comme partenaire industriel le site sidérurgique de Voestalpine Stahl de Linz en Autriche, a permis d'étudier une technologie basée sur la granulation à sec des laitiers de haut-fourneau, en utilisant de l'air pour refroidir les laitiers en fusion, et permettant de récupérer l'énergie issue du refroidissement du laitier pour des applications en chauffage ou pour la génération d'énergie électrique. Dans le même temps, on a vérifié que les laitiers de haut-fourneau ainsi granulés respectaient bien les mêmes spécifications et les mêmes critères que les LHF granulés par voie humide, dans le cadre de leur utilisation dans l'industrie cimentière.

Le projet a été officiellement lancé le 1^{er} septembre 2011, lorsqu'un pilote de laboratoire a été mis en place au sein des installations d'essai de l'Université de Leoben (Autriche), suivi par une série de tests de refroidissement. Entre l'été 2011 et juin 2013, plusieurs campagnes d'essais de granulation à sec de laitiers ont ainsi été réalisées en utilisant des laitiers de haut-fourneau refondus. La qualité

du laitier produit et les températures de sortie des gaz, couplés à la calibration d'un modèle CFD (Computational Fluids Dynamics) utilisant les données expérimentales se sont avérées très prometteuses, ouvrant la voie à la construction d'une installation pilote industrielle, qui sera établie sur le haut fourneau «A» du site Voestalpine Stahl de Linz en Autriche. Les prochaines campagnes d'essais sont prévues pour le début de l'année 2015, afin de déterminer précisément les limites du process, et de fournir les bases pour la commercialisation d'une installation complète avec récupération de chaleur.

Les résultats de ces campagnes sont également utilisés pour calibrer un modèle 3D CFD, base de la conception de l'installation à l'échelle industrielle, et qui permettra le développement d'une usine pilote qui sera construite sur le site de l'un des partenaires industriels à définir.

Substitution de clinker par du laitier granulé

Traditionnellement, la fabrication du clinker est réalisée à partir de calcaire, de sable, d'argile et d'autres constituants (dont le fer), et nécessite une température de process élevée (environ 1450° C). Cela requiert donc une quantité importante de matières premières naturelles minérales et d'énergie primaire, et génère des émissions de CO₂ élevées (environ 1t de CO₂ par tonne de clinker). La substitution de clinker par des laitiers de haut-fourneau granulés constitue une alternative économique intéressante pour l'industrie cimentière, car elle permet de réduire les coûts énergétiques élevés du process de production classique à partir du clinker et améliore considérablement le bilan CO₂ de cette production. Ainsi, c'est 750 kg à 1000 kg de CO₂ qui peuvent être économi-

sés pour chaque tonne de clinker substituée par du laitier granulé (sources : fiches CTPL), du fait non seulement de l'économie d'énergie primaire, mais aussi parce que l'émission du dioxyde de carbone chimiquement présent au sein du calcaire est évitée.

Granulation par voie humide

Technique de granulation «conventionnelle» pour la production de laitiers de haut-fourneau granulés

Dans ce cas, le laitier est rapidement «trempé» sous forme liquide au sein d'une installation de granulation par voie humide, utilisant des quantités importantes d'eau. Le laitier refroidi apparaît comme un matériau granulaire fin (sable 0/2mm), vitrifié (amorphe) et humide, connu sous l'appellation de laitier granulé. En raison de l'énergie latente de cristallisation, le laitier lorsqu'il est moulu avec les fines du ciment, réagit au contact de l'eau pour former des produits d'hydratation (comportement hydraulique latent). Ces constituants minéraux correspondent essentiellement aux mêmes phases que celles obtenues par hydratation du clinker, principal constituant du ciment Portland (CEM I). C'est la condition pré-requise pour permettre l'utilisation du laitier granulé comme liant hydraulique dans l'industrie des matériaux de construction.

C'est actuellement plus de 80 % des laitiers de haut-fourneau qui sont utilisés comme constituant des ciments ou, directement en addition de Type II, en substitution partielle du ciment pour la formulation des bétons, permettant ainsi de réaliser un chiffre d'affaire substantiel et d'éviter des rejets de CO₂.

Le procédé conventionnel de granulation par voie humide fonctionne avec un ratio eau/laitier élevé, proche de 8:1, et s'adapte difficilement aux fluctuations de quantité et de qualité (propriétés) des laitiers alimentant l'installation de granulation. En outre, il présente les inconvénients suivants :

- malgré une déshydratation mécanique dans des tambours, des silos ou en tas, une humidité résiduelle d'environ 10-12% perdure au sein du laitier granulé. Pour la fabrication de ciment, le produit doit par conséquent d'abord être (re)séché, avec une dépense énergétique élevée. En supposant une humidité résiduelle de 10 %, l'énergie nécessaire pour le séchage est d'environ 132 kWh par tonne de laitier,

- lors de la granulation en circuit ouvert, une vapeur contenant du soufre peut être émise, nécessitant qu'une importante quantité d'eau fraîche (environ 1 m³/t) soit introduite en continu dans le système. Les installations de granulation avec circuits d'eau fermés et systèmes de condensation permettent d'éviter l'émission de vapeur d'eau contenant du soufre et les odeurs associées,

- lorsque le laitier est trempé avec l'eau, l'énergie potentielle élevée du laitier en fusion est gaspillée en chauffant et en évaporant l'eau. Pour la granulation, on utilise habituellement de l'eau froide, l'eau en circulation devant être refroidie par des tours de refroidissement, parfois équipées de ventilateurs électriques. Au final, la chaleur est rejetée dans l'environnement à basse température sans être utilisée/valorisée.

Granulation par voie sèche

Technique alternative pour la production de laitiers de haut-fourneau vitrifiés

Les quantités importantes d'eau et d'énergie utilisées pour le refroidissement et le séchage du laitier peuvent être évitées par une projection à sec du laitier en fusion et un refroidissement rapide à l'air. Le préalable indispensable à la mise en place d'une technique alternative par voie sèche est la certitude d'obtenir un laitier ayant des propriétés hydrauliques identiques, voire encore meilleures, que celles d'un laitier granulé classiquement produit à l'aide d'une granulation par voie humide. Cela s'applique

en particulier au taux de verre (valeur cible à atteindre > 95 % de phase vitreuse), qui constitue un paramètre clé pour la réactivité hydraulique, et par conséquent le critère essentiel d'acceptabilité du laitier granulé pour une utilisation en cimenterie.

Le taux de verre a un impact direct sur la résistance mécanique des ciments et des bétons. Cependant, le taux de verre minimum exigé ne peut être obtenu que par un refroidissement brutal au-dessous de la température de transformation d'environ 900° C. À cause du mécanisme de refroidissement moins efficace sans présence d'eau, le process de granulation par voie sèche est techniquement plus difficile à maîtriser que la granulation en voie humide conventionnelle.

Une granulation considérée comme par «voie sèche» ne nécessite aucun séchage ultérieur du produit. Cela conduit à une réduction d'environ 30 kg de CO₂ par tonne de laitier granulé par rapport à la voie humide. Compte tenu de la production mondiale d'environ 210 millions de tonnes de laitiers granulés (données 2007), cela équivaut à une réduction potentielle de CO₂ de plus 6,3 millions t/an à l'échelle de la planète.

Il existe deux cas de figure pour alimenter les installations de granulation en laitier :

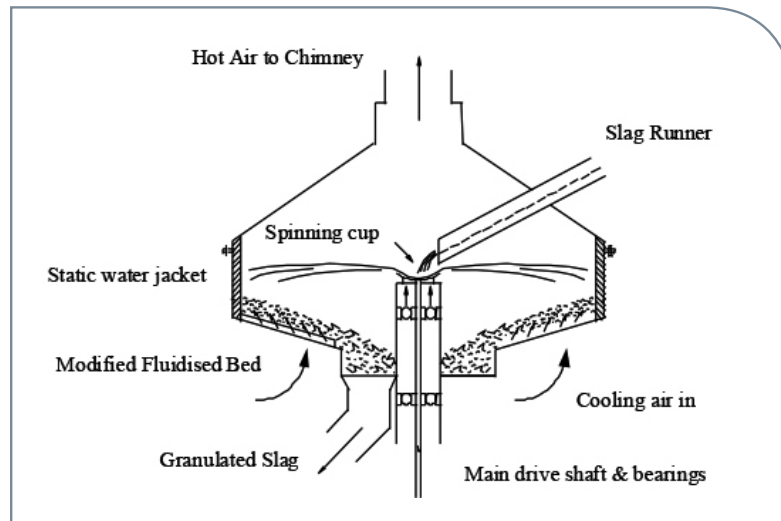
- le premier cas est lorsque le granulateur se trouve à proximité du haut-fourneau, ce qui permet d'alimenter l'installation de granulation en laitier directement depuis le trou de coulée. Ce sera la méthode utilisée pour la prochaine phase du projet.
- La seconde possibilité est un système situé à distance du haut-fourneau, impliquant le transfert du laitier dans des poches (cuviers ou poches torpilles) qui sont déversées dans le granulateur via un dispositif de basculement. Cette méthode peut cependant présenter certains problèmes potentiels ultérieurs du fait de l'influence du temps et des conditions de transport du laitier sur la température de livraison à l'ins-

tallation de granulation, et donc sur le taux de verre obtenu. Les laitiers montrant une acidité importante (richesse en SiO₂) ont tendance à avoir un liquidus plus étroit et un seuil de température de cristallisation plus élevé, ce qui nécessite dans ce cas de maintenir une température plus élevée, généralement supérieure à 1250°C pour assurer au laitier granulé un taux de verre satisfaisant.

La granulation du laitier en lien direct avec le haut-fourneau est techniquement plus difficile à gérer qu'une granulation alimentée par poches ou cuviers et dont la fréquence peut être régulée. Par conséquent, il y a deux concepts possibles pour le granulateur, un adapté à une installation directement à la sortie du haut-fourneau et l'autre, moins complexe, adapté à n'importe quelle autre implantation.

Le premier modèle de granulation par voie sèche des laitiers peut offrir une option très simple, à faible coût pour le traitement des laitiers avec seulement une coupelle tournante installée au bout du canal de coulée. Les grains de laitier peuvent ainsi être simplement projetés par la coupelle en rotation et collectés par un chargeur après chaque coulée. Cette méthode simple permet de produire un laitier granulé utilisable en cimenterie, malheureusement sans possibilité de récupérer la chaleur.

La deuxième solution, plus pratique, tout en gardant à l'esprit le manque d'espace disponible autour d'un haut-fourneau, est de confiner la projection des grains de laitier dans un conteneur; dans ce cas, une circulation d'air est indispensable, rendant alors possible la récupération de la chaleur à partir de la température des gaz de sortie.

**Figure 1**

Concept de la granulation par voie sèche

La granulation par voie sèche du laitier de haut-fourneau est fondée sur la dispersion du laitier en fusion en utilisant une « coupelle » ou « assiette » rotative à vitesse variable (voir Figure 1). Le laitier est amené du trou de coulée au centre de la coupe via un tuyau vertical revêtu de réfractaires. Les forces de rotation (centrifuges) de la coupe projettent le laitier vers l'extérieur (voir Figure 2).

Les gouttelettes de laitiers qui en résultent refroidissent au cours de leur envol vers la paroi de la chambre refroidie à l'eau. Lors de l'impact avec la paroi, les gouttelettes sont suffisamment solidifiées pour qu'elles ne collent pas à celle-ci. Ce comportement est amélioré par le refroidissement de cette paroi par circulation d'eau interne.

Les grains ainsi solidifiés retombent dans un lit fluidisé de grains, maintenu en mou-

vement permanent de sorte qu'il n'y ait aucun phénomène d'agglomération. Ce lit est maintenu en mouvement par la conception du distributeur d'air froid, qui imprime un mouvement circulaire aux particules de laitier solidifié.

Ces particules tombent dans un bac de déchargement formant un anneau interne. Une partie de ces grains est recyclée pour constituer un « rideau » destiné à intercepter en vol les particules en cours de solidification quittant la coupe rotative, afin d'aider à leur refroidissement. Le reste des particules termine son refroidissement en même temps qu'elles descendent vers le bac de déchargement, puis lors de leur transfert sur des bandes transporteuses vers leur lieu de stockage.

Figure 2
Atomisation du
laitier liquide)



Tout envol de particules dans le flux d'air de refroidissement est minimisé par les redresseurs de flux situés dans la partie supérieure de la chambre qui permettent de réduire les vitesses dans cette zone. L'air (chaud) est finalement évacué au moyen d'une (ou plusieurs) cheminée(s). Pour les applications au laitier de haut-fourneau, des filtres et collecteurs de fibres de laitier sont prévus.

R & D dans le domaine de la granulation par voie sèche : les développements engagés par SIEMENS VAI

Compte tenu de l'importance croissante des considérations relatives à la sauvegarde de l'environnement et à l'économie d'énergie, maintenant recommandées par la législation européenne, il peut être nécessaire d'améliorer les technologies de traitement des laitiers. La faisabilité d'un process de traitement des laitiers de haut-fourneau en fusion par dispersion du laitier liquide à l'aide d'une coupelle rotative a été dûment démontrée par Siemens VAI, et les laitiers granulés qui en résultent montrent un taux de verre supérieur à 95 %, taux qui les rendent propres à une utilisation dans l'industrie cimentière. Le défi et l'objectif actuel est maintenant de produire les mêmes laitiers granulés, avec de l'air à une température suffisamment élevée pour s'assurer que le processus permet la récupération de chaleur à une échelle industrielle et commerciale.

Le projet de R & D en cours se déroule en 3 phases :

- la première phase (phase 1) concerne la conception d'une installation pilote de granulation à échelle réduite (laboratoire), d'une capacité nominale de 60 kg/mn,
- la deuxième phase (phase 2) porte sur la mise au point d'une installation pilote industrielle, attachée à un haut-fourneau, d'une capacité nominale de 1 à 3 t/mn,
- la troisième et dernière phase (phase 3) comprendra un système complet de récupération de chaleur basé sur les principaux composants de l'équipement de la phase 2.

De la Phase 1 à la Phase 2

Une série de campagnes d'essais a été réalisée à l'aide d'une installation pilote de granulation à échelle réduite (laboratoire), d'une capacité nominale de 60 kg/mn de laitier liquide, située à l'Université de Leoben en Autriche de manutention (voir Figure 3).



Figure 3
Granulateur pilote expérimental
à l'Université de Leoben

Les résultats obtenus ont été conformes aux attentes et ont permis de valider les calculs réalisés par le modèle CFD 3-D, en ce qui concerne la taille des particules et des températures d'échappement, lors des études de faisabilité préliminaires (voir figure 4).

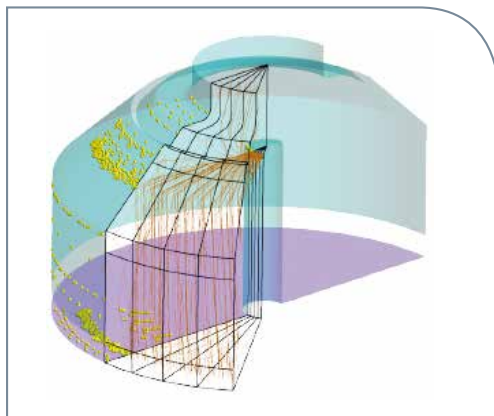


Figure 4
Modèle CFD 3-D
illustrant la trajectoire et la température des particules

Le succès des essais menés à l'Université de Leoben a permis d'enclencher la phase 2 du programme de recherche, au cours de laquelle le process de granulation par voie sèche est développé à l'échelle industrielle, avec une installation pilote construite sur le site du partenaire industriel VoestAlpine Stahl à Linz. Cette phase de validation industrielle est actuellement en cours, sous la coordination de SIEMENS VAI, en collaboration avec VoestAlpine Stahl, ainsi que les partenaires scientifiques de l'Université de Leoben et du FeHS en Allemagne.

Résultats des essais pilotes expérimentaux menés à l'université de leoben (autriche)

Propriétés chimiques et mécaniques des laitiers

Lorsqu'il est frais, le laitier de haut-fourneau peut dégager du dioxyde de soufre, et lorsqu'il est granulé en présence d'eau dans des installations par voie humide, des émis-

sions de sulfure d'hydrogène (odeur d'œuf pourri) et d'acide sulfurique sont possibles. Ceci constitue des nuisances, rapidement maîtrisées puisque le matériau se stabilise lorsqu'il refroidit, le potentiel des lixiviats diminuant très rapidement après le premier essorage sur le site de stockage.

Le process de granulation par voie sèche permet d'éliminer la génération de sulfure d'hydrogène (H_2S) et de réduire considérablement les émissions de soufre. Par ailleurs, la lixivabilité du soufre et des autres composés est également réduite du fait de la nature vitreuse du produit.

La qualité du laitier granulé par voie sèche ainsi produit permet d'obtenir un taux de verre supérieur à 95 % sur toutes les granulométries des particules (1-6 mm), avec une très faible porosité de surface des grains (voir figures 5a et 5b).

Par ailleurs, la perte au feu est < 0.1 %.

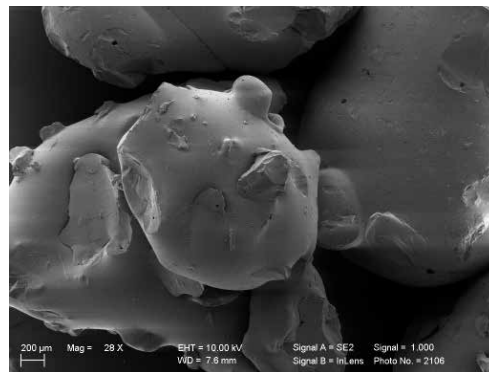


Figure 5a
Vue au MEB (x 25) des grains < 3mm
illustrant la faible porosité de surface

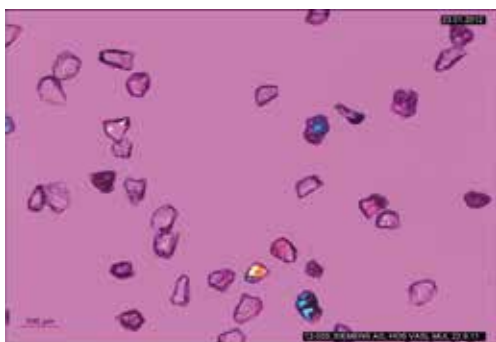


Figure 5b
Analyse des laitiers montrant la structure vitreuse des grains broyés à 40-60 microns

La taille moyenne des particules de laitier granulé est comprise entre 1 et 3 mm (voir tableau ci-dessous montrant une analyse granulométrique typique), dépendant de la vitesse de rotation de la coupelle, et des propriétés des laitiers.

TAILLE DES PARTICULES (EN MM)	% DE LA FRACTION	PASSANT CUMULÉ (EN %)
0-1	7.02	7.02
1-2	39.64	46.65
2-3	33.36	80.02
3-4	16.11	96.13
4-6,3	3.87	100.00
Total	100.00	-

Tableau 1

Une comparaison visuelle peut être faite entre des laitiers granulés obtenus à l'aide d'une installation de granulation par voie sèche (voir Figure 6), et la méthode classique de granulation par voie humide (voir Figure 7).



Figure 6
Laitier granulé à sec



Figure 7
Laitier typique granulé par voie humide produit à Leoben

En complément, et compte tenu du fait que le laitier granulé est prévu pour être utilisé comme matière première pour l'industrie des liants hydrauliques (ciment, additions pour les bétons, ...), l'énergie de broyage nécessaire pour réduire les grains secs de 3mm pour atteindre 4000 cm²/g (Blaine) est également un facteur très important. Celle-ci est de 70Kwh/t, ce qui est tout à fait comparable à celle nécessaire pour la voie humide.

sèche (50 % de substitution) sont comparables avec ceux d'un CPA (100%) à partir du 28^e jour de durcissement. Ces performances correspondent également à celles obtenues à l'aide de laitier granulé humide.

Les températures de sortie à la cheminée obtenues dans l'installation pilote de granulation à échelle réduite de Leoben, montrent qu'une température cible comprise entre

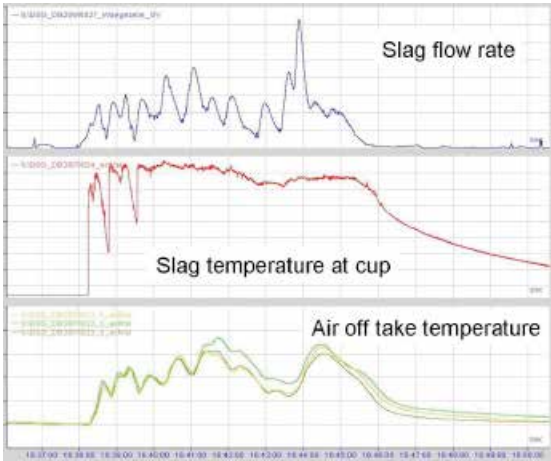
TEMPS DE DURCISSEMENT (JOURS)	RÉSISTANCE À L'ÉCRASEMENT (MPa)	
	100 % CPA*	50 % CPA* / 50 % GBS*
2	34,3	15,6
7	49,5	34.1
28	59,6	57.2
91	66.1	69,2
Notes	CPA – ciment Portland artificiel GBS – laitier de haut-fourneau granulé à sec	

Tableau 2

Le tableau suivant illustre la résistance à l'écrasement (compression) d'une éprouvette de ciment Portland classique (100 % CPA) et d'une autre éprouvette lorsque 50 % du CPA est substitué avec laitier de haut-fourneau granulé à l'aide de la méthode de granulation par voie sèche, en fonction de la durée de durcissement. Les résultats expérimentaux montrent que les performances obtenues à l'aide d'un laitier granulé par voie

400 et 650 °C est réalisable à l'échelle du laboratoire (voir Figure 8). Les calculs pour une installation pilote industrielle, basés sur le modèle CFD 3-D qui a été étalonné à l'aide des données expérimentales issues de l'installation pilote de Leoben, montrent que l'obtention de cette température cible est également réalisable à l'échelle industrielle. Pour chaque tonne de laitier granulé, la récupération potentielle d'énergie serait alors équivalente à celle permettant la production de 6 MWél d'électricité, sur la base d'un débit d'une tonne de laitier par minute (1 t/mn), débit typique de laitiers issus d'un haut-fourneau (ce qui correspond à une production nominale d'environ 4 800 tonnes d'acier/jour).

Figure 8
Exemple de collecte de données sur l'installation de l'Université de Leoben



DÉVELOPPEMENTS LIÉS À LA RÉCUPÉRATION DE LA CHALEUR

Plusieurs systèmes permettant d'utiliser l'énergie contenue dans l'air chaud produit et issu du granulateur ont été examinés. La complexité majeure du fonctionnement de ces systèmes est la disponibilité intermittente du laitier en fusion.

La température de l'air sortant du granulateur est estimée à 400 °C. En réglant la distribution de l'air de refroidissement, cette température pourrait être augmentée de manière significative, peut-être jusqu'à 650 °C. L'air chaud pourrait être utilisé directement pour le chauffage, le séchage, ou encore

pour la génération de vapeur, auquel cas un accumulateur serait nécessaire pour réguler le flux de vapeur en sortie. Ces systèmes de récupération peuvent être développés et couplés à la fois à l'installation de granulation de laitier de haut-fourneau, et au système de déversement des laitiers.

Selon le paramétrage de l'installation, l'énergie peut être utilisée directement pour le préchauffage ou le chauffage (voir Figure 9), ou pour la production de vapeur et/ou d'électricité (voir Figure 10).

Pour un débit massique de laitier sortant du haut-fourneau de 1 t/mn¹, le potentiel d'énergie générée a été calculé comme équivalent à plus de 20 MW_{th} (chauffage) ou, alternativement, à une production d'électricité (via la génération de vapeur) d'environ 6 MW_{el}.

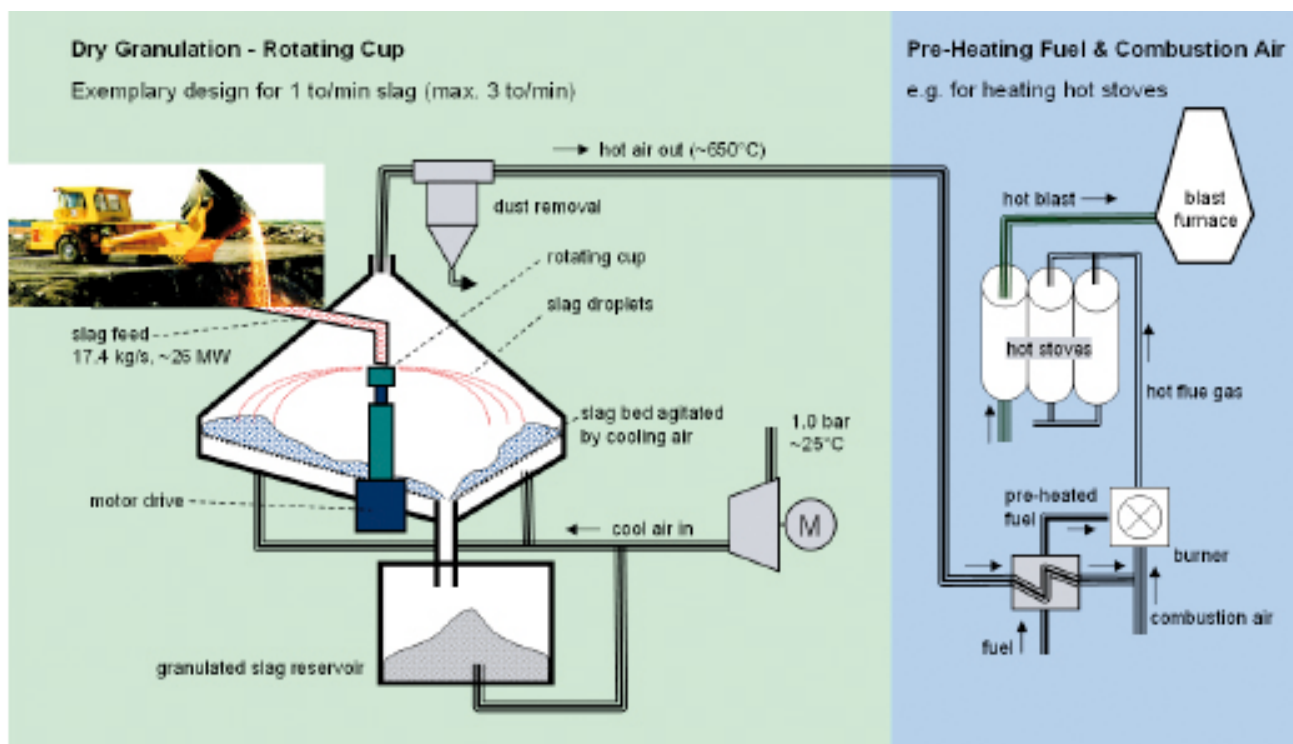


Figure 9

Granulation de laitier par voie sèche avec préchauffage (potentiel de 20 MW_{th}, calculé pour une installation traitant 1t de laitier par mn)

1 - Flux moyen de laitier pour un haut-fourneau avec une production annuelle de 1,7 millions de tonnes, et un taux de laitier de 30 % (pour 100 d'acier).

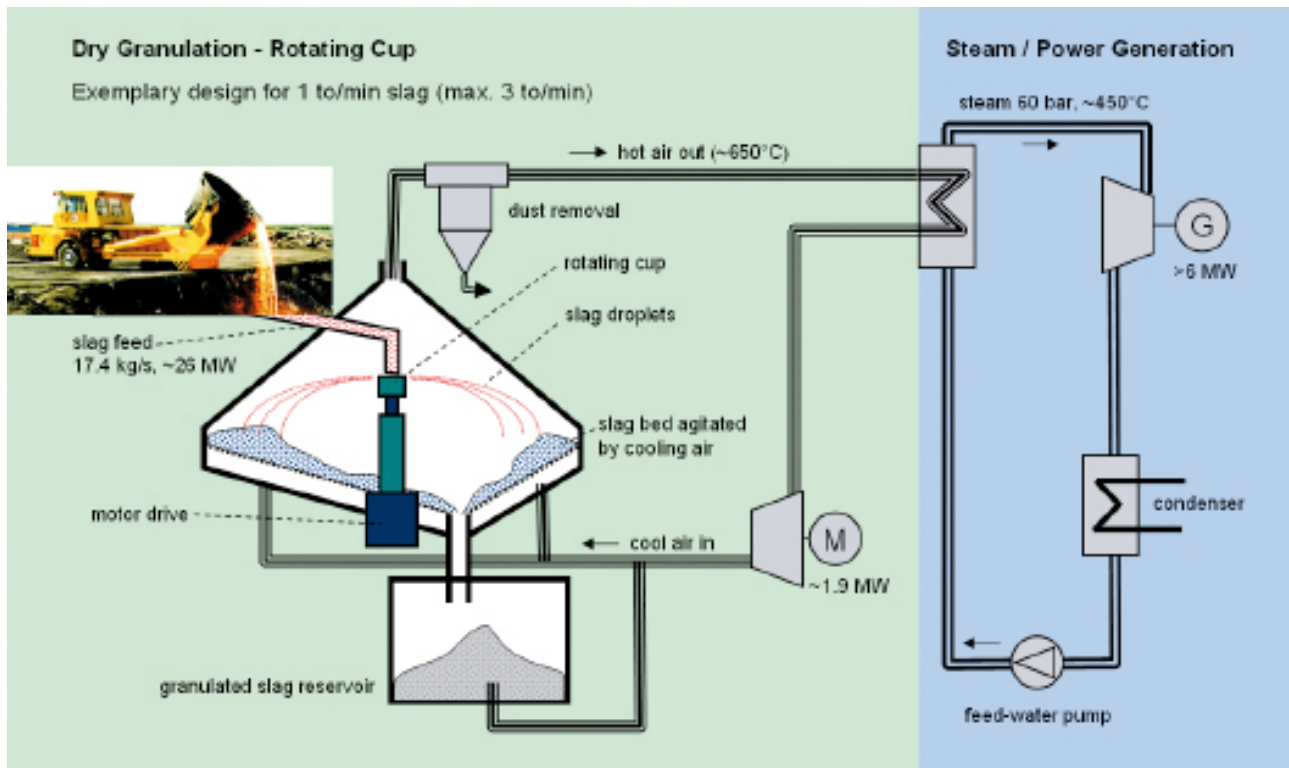


Figure 10

Granulation par voie sèche de laitier avec génération de vapeur (potentiel de 6 MW_{el} calculé pour une installation traitant 1t de laitier par mn)

Conclusions

Le laitier de haut-fourneau liquide représente une des plus importantes réserves d'énergie thermique pour l'industrie sidérurgique qui ne soit pas encore utilisée. De par les développements engagés et les progrès réalisés à ce jour avec les partenaires scientifiques et industriels du projet, Siemens Metals Technology entrevoit la première solution pratique et durable pour la récupération de la chaleur issue du laitier de haut-fourneau à l'échelle industrielle.

Les perspectives d'une récupération de la chaleur et d'une meilleure empreinte écologique (émissions de CO₂) apparaissent comme des avantages indéniables pour le sidérurgiste. Les avantages pour le fabricant de ciment sont également importants,

puisque'il dispose ainsi d'un produit de première qualité, sec, vitreux et facile à utiliser.

Cette excellente adéquation avec les besoins des clients permet d'envisager la granulation par voie sèche des laitiers avec récupération de chaleur comme un des programmes prioritaires de recherche et développement, visant à offrir à une clientèle bien identifiée une solution adaptée à haute valeur ajoutée.

Le site sidérurgique pilote pour la prochaine phase de recherche (phase 2) sera le haut-fourneau «A» du site VoestAlpine Stahl à Linz en Autriche. L'installation qui y sera construite permettra de gérer les flux de laitier complet du haut-fourneau, en mobilisant un de ses trois trous de coulée, et elle devrait être mise en service au cours de l'année 2015.

Avantages de la granulation de laitier de haut-fourneau par voie sèche

- La récupération de chaleur rendue possible grâce à une température de process prolongée,
- Des laitiers granulés présentant une très bonne qualité, et pouvant être facilement utilisés dans l'industrie cimentière,
- Un coût global potentiellement plus faible qu'un système humide équivalent,
- Des coûts d'exploitation et de maintenance potentiellement plus faibles que ceux d'un système humide équivalent,
- Une consommation d'eau significativement plus faible, sans contact direct avec le laitier,
- Aucun risque de contamination des eaux souterraines lors de l'essorage de l'eau de refroidissement des laitiers,
- Un produit sec facile à manipuler et utiliser,
- Aucun coût de séchage en aval requis par le fabricant de ciment, dans la mesure où il est consommé immédiatement après sa production, ou au minimum, qu'il soit conservé à l'abri des intempéries,
- Aucune émission de vapeur et de nuisances associées, limitation des impacts environnementaux
- Réduction significative des émissions de soufre.

Dans les précédents NUMÉROS...

N° 94 (novembre 2008)

• Laitier de haut fourneau moulu : il a sa place dans le béton

Pays-Bas : Les combinaisons de CEM I et de laitier de haut fourneau moulu au malaxeur à béton : équivalence de performance vis-vis des CEM III ?

Anne-Marie Marion, Nicolas Musikas : *Ecocem Materials Limited*

• Laitiers d'aciérie électrique ; la route est ouverte !

France : Valorisation des laitiers d'aciérie électrique : une dynamique d'amélioration continue

Françoise Viez : *Parsider - Riva Acier - Usine de SAM Montereau*

N° 95 (mars 2010)

• Infrastructures routières : ouvrons la voie aux scories LD

Analyse du potentiel de valorisation de scories LD comme agent de traitement pour améliorer les sols cohésifs.

Benoît Janssens, chercheur : *Centre de Recherches Routières, Belgique*

• Des laitiers qui purifient l'eau : cela coule de source !

Utilisation des laitiers sidérurgiques pour le traitement des eaux usées.

Florent Chazarenc : *Ecole des Mines de Nantes, Laboratoire GEPEA, UMR CNRS 6144, Département Systèmes énergétiques et Environnement.*

• Où sont passés les laitiers en 2008

Utilisation des laitiers sidérurgiques en 2008 en France.

Jérémy Domas : *Directeur du CTPL*

N° 96 (novembre 2010)

• Laitiers utilisés en techniques routières : la filière se professionnalise

Campagne de suivi de plots expérimentaux : Pour une utilisation raisonnée des laitiers sidérurgiques en travaux publics.

Jérémy Domas : *Directeur du CTPL*

• Où sont passés les laitiers en 2009

Utilisation des laitiers sidérurgiques en 2009 en France.

Jérémy Domas : *Directeur du CTPL*

• Journée d'information du CTPL

Résumés des interventions sur les thèmes des réglementations, statuts et normes concernant les laitiers sidérurgiques.

N° 97 (avril 2011)

• Les laitiers d'aciérie électrique au secours des récifs coralliens

Egypte : utilisation de laitiers d'aciérie électrique comme substrats pour la régénération des récifs coralliens.

Nadia Habib : *Coraliareef*

• Techniques routières : les laitiers de convertisseur font désormais jeu égal avec les granulats naturels

Maîtrise de l'expansion des laitiers. Valorisation des laitiers d'aciérie de conversion en technique routière.

Thomas Muckensturm & Pierre Todaro : *Eurogranulats*

N° 98 (octobre 2011)

• Le CTPL et la R&D :

Exemple du projet ANR éclair

Jérémy DOMAS : *Directeur du CTPL*

• Les laitiers LD tiennent la route !

Impact environnemental : évaluation du comportement environnemental d'un laitier LD d'aciérie de conversion utilisé en construction routière.

Michel LEGRET : *IFSTTAR, Institut français des sciences et technologies des transports, de l'aménagement et des réseaux Département Géotechnique, Eau et Risques*

• Et si les vers de terre avaient leur mot à dire !

Évaluation écotoxicologique : analyse des effets sur les vers de terre de lixiviats issus d'un plot de laitiers LD.

Yvan CAPOWIEZ, Magali RAULT, Christophe MAZZIA : *INRA Avignon*



• Où sont passés les laitiers en 2010

Production et devenir des laitiers sidérurgiques en 2010 en France.

Jérémy Domas : Directeur du CTPL

N° 99 (avril 2012)

• Bonne route avec les granulats de laitiers EAF !

Grèce : Utilisation de laitiers d'aciérie de four électrique en enrobé bitumineux en couche mince anti-dérapante.

Ioannis Liapis : Civil Engineer, BEng, MSc, DIC, PhD Candidate, AEI FOROS SA

Spiraggelos Likoydis : Geologist, Director of P.Y.TH. Laboratory, EGNATIA ODOS SA

• Laitiers d'aciérie de conversion : sélection à la source !

Sélection à la source des laitiers d'aciérie de conversion en vue de leur valorisation en technique routière

Julien Waligora : EIFFAGE Travaux Publics, Laboratoire Central Ciry

Michel Measson : EIFFAGE Travaux Publics, Direction Recherche et Développement

David Bulteel : Ecole des Mines de Douai

N° 100 (octobre 2012)

• Le CTPL, un peu d'histoire

CTPL : un organisme dédié aux laitiers sidérurgiques

Jacques Reynard : CTPL

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

Evolution de la gestion des laitiers au cours des dix dernières années

Jérémy Domas : Directeur du CTPL

• Valorisation des laitiers : cadre juridique

Etat des lieux juridique et statut des laitiers sidérurgiques

Jacques Reynard : CTPL

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

Le guide SETRA pour l'acceptabilité environnementale des laitiers sidérurgiques en technique routière

Jérémy Domas : Délégué Général du CTPL

• Réalisations remarquables

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

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

Jean-Marie Delbecq : BSME

N° 101 (juillet 2013)

• Une valorisation en béton !

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

Gildas ADEGOLOYE :

L2MGC, Université de Cergy-Pontoise

Anne-Lise BEAUCOUR :

L2MGC, Université de Cergy-Pontoise

Sophie ORTOLA :

L2MGC, Université de Cergy-Pontoise

Albert NOUMOWE :

L2MGC, Université de Cergy-Pontoise

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

Jacques Reynard : CTPL

• Des laitiers très protecteurs

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

Benjamin LACLAU, NOBATEK

Bruno BOUQUET, T.S.V.

N° 102

(juin 2014)

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

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

Dr Deborah Proctor



• Des laitiers bons pour le service !

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

Laurent BUTEZ - SGA



www.ctpl.info