

LAITIERS sidérurgiques

N°115

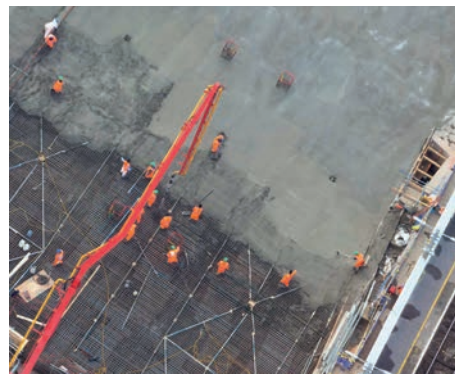
Décembre 2023

page 6

Actualaitiers

page 12

**Acier et ciment
Enjeux d'une
production
«Net zéro»**



page 24

**Que sont devenus
les laitiers en 2022 ?**

page 18

LAITIERS DE FOUR À ARC ÉLECTRIQUE
**Développement de nouvelles
filières dans l'industrie
des liants hydrauliques**

CTPL

CENTRE TECHNIQUE
ET DE PROMOTION
DES LAITIERS SIDÉRURGIQUES

ecart



Notre révolution est en marche !

En cette fin d'année 2023 qui se présente à nous, j'ai cette étrange impression de revivre la fin d'année 2022 : des conditions de marché atones, une industrie sidérurgique française « à la peine », et des incertitudes persistantes quant à des filières historiques pour les laitiers sidérurgiques. Tout cela devrait-il nous inciter à tomber également dans la morosité et le pessimisme ambiant ? Malgré cette situation complexe, j'ai tout de même envie de voir plus loin, et d'être plus positif.

Alors forcément, vous ne manquerez pas de vous interroger sur cet optimisme que certains considéreraient comme « forcené » – ou pour le moins excessif –, mais il me semble disposer de raisons objectives pour supporter cet état de fait. L'optimisme passif, « béat », ne génère que de l'attente, mais l'optimisme utile génère des actions et des initiatives. Compte tenu de la nécessaire décarbonation des procédés sidérurgiques visant au respect des objectifs européens très ambitieux, une révolution industrielle s'engage pour notre profession dans les prochaines années.

Ce verdissement attendu – et d'ores et déjà engagé – de notre industrie s'accompagnera également d'une nécessaire gestion optimisée et raisonnée des co-produits qui seront générés par ces nouveaux procédés industriels. Cette problématique fait l'objet du contenu de ce numéro de notre revue Laitiers Sidérurgiques n° 115, avec deux articles dans cette ligne éditoriale.

Un premier article prospectif de notre confrère Jean-Pierre Birat nous propose une projection de l'évolution attendue des procédés sidérurgiques, et de certaines des conséquences potentielles pour la valorisation des laitiers sidérurgiques qui en découleront. Du fait de la disparition progressive des hauts-fourneaux et de leur remplacement par des fours électriques, l'évolution naturelle sera l'apparition de volumes conséquents de laitiers d'aciérie de four électrique. Le second article technique de notre adhérent Ecocem nous projette ainsi dans le développement de nouvelles filières pour ces laitiers, en particulier en vue de leur utilisation dans l'industrie des liants hydrauliques.

Voilà aujourd'hui pourquoi j'ai envie d'être optimiste ! Oui, cette révolution industrielle pour notre industrie nous propose de nouveaux challenges, et nous offre des opportunités qu'il convient de saisir dès à présent. En conséquence, de nombreux développements techniques et scientifiques sont attendus dans ce domaine pour les prochaines années.

Le CTPL restera plus que jamais un des acteurs principaux engagé pour répondre à 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 **6** **Actualaitiers**

page **12** **Acier et ciment**
Enjeux d'une production
«Net zéro»

L'acier et le ciment entretiennent une relation synergique depuis près d'un siècle, c'est-à-dire depuis que les hauts-fourneaux sont au cœur de la production de masse d'acier. En effet, les hauts-fourneaux (HF) transforment le minerai de fer en fonte et en laitier (laitier de HF), ce dernier constituant un intrant important dans la fabrication du ciment, mélangé au clinker produit par les fours de cimenterie.



Dans le passé, les sidérurgistes ont produit eux-mêmes du ciment, jusqu'à ce qu'ils externalisent cette activité pour la confier à des pure players du secteur du ciment. Le laitier HF est alors devenu un sous-produit de la sidérurgie que les producteurs de ciment ont tenu à utiliser en raison de son prix attractif et parce qu'ils considéraient que son empreinte carbone était nulle.

L'acier et le ciment continuent à travailler en synergie. Aujourd'hui, les deux industries présentent à peu près la même empreinte carbone (6-7 % des émissions mondiales) et doivent la contrôler rigoureusement, c'est-à-dire converger vers un bilan net nul d'ici à 2050. Chaque secteur étant distinct, il s'efforce à sa manière de présenter des solutions permettant de réduire radicalement ses émissions. Ce que l'acier prévoit de faire peut donc nuire aux efforts du ciment pour réduire sa propre empreinte carbone. C'est ce que le présent article se propose d'analyser.

Jean-Pierre BIRAT - IF Steelman, senior consultant

Laitiers de four à arc électrique Développement de nouvelles filières dans l'industrie des liants hydrauliques

Les laitiers de four à arc électrique (dits LAFE) sont des sous-produits de la sidérurgie. Leur production tendra à augmenter considérablement dans les années à venir, notamment en Europe en raison du remplacement des hauts-fourneaux par la voie de « réduction directe – DRI-EAF ».

Contrairement au laitier de haut-fourneau granulé broyé, couramment utilisé comme substituant de ciment, il n'existe pas encore d'utilisation satisfaisante des LAFE dans l'industrie des liants hydrauliques bien que des essais aient été initiés, par le passé, pour l'utilisation des LAFE en granulats [1], en mélange de ciment [2, 3] ou en matériaux alcali-activés [4] après avoir été carbonatés [5] ou modifiés à l'état liquide [3, 6].



Ici, la structure minéralogique du LAFE tel que généré, a été étudiée pour définir le potentiel hydraulique du matériau comme constituant principal de liants hydrauliques.

*Simon BLOTEVOGEL - Ecocem Materials
et LMDC, Université de Toulouse, INSA/UPS Génie Civil
Thomas WATTEZ, Roberta ALFANI, Laurent FROUIN - Ecocem Materials
Martin CYR - LMDC, Université de Toulouse, INSA/UPS Génie Civil*

Que sont devenus les laitiers en 2022 ?

Comme chaque année, le Centre Technique et de Promotion des Laitiers sidérurgiques (CTPL) a lancé en 2023 l'enquête nationale relative aux flux de laitiers sidérurgiques produits sur le territoire national en 2022.

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

Shahinaz SAYAGH - CTPL

LAITIERS SIDÉRURGIQUES

77^{ème} année
Revue éditée et diffusée
gratuitement par le CTPL

Directeur de la publication
Jérémy DOMAS,
Délégué Général

Rédacteur en chef
Shahinaz SAYAGH,
Directrice

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

Conception - Réalisation
BC Consultants :
06 13 51 27 39

Les articles publiés
n'engagent que la
responsabilité de leurs
auteurs.
Crédit photos : Adobe Stock,
ArcelorMittal, CTPL, Ecocem

N° ISSN 1166 - 3138
Dépôt légal :
2^{ème} semestre 2023

Fonctionnement du CTPL

Réunions du CA et de l'AG du CTPL

Les réunions du Conseil d'Administration et de l'Assemblée Générale du CTPL se sont déroulées en présentiel, le 13 avril 2023, à Paris. Cela a été l'occasion de faire un point d'avancement avec nos Administrateurs et l'ensemble de nos Adhérents sur les actions techniques, réglementaires et normatives réalisées au cours de l'année 2022 et de proposer les principaux axes de travail et pistes de réflexion, ainsi que les aspects budgétaires envisagés pour l'exercice 2023. Le Conseil d'Administration (CA), s'est réuni de nouveau le 19 décembre 2023, en visioconférence.

Conférences et congrès internationaux



Conseil d'Administration d'EUROSLAG

Au cours des 12 derniers mois, deux réunions du Conseil d'Administration d'EUROSLAG se sont tenues en visioconférence : le mercredi 25 mai et le jeudi 24 novembre 2022. L'objectif était d'établir la stratégie de l'Association, et de définir des positions de principe à retenir par la profession sur les grands enjeux liés aux développements réglementaires et normatifs européens.

Depuis le 1^{er} janvier 2023, c'est le CTPL qui est Administrateur pour une période de trois ans, afin de représenter la France. Ceci se déroule en alternance avec l'AFOCO, qui reprendra donc à compter du 1^{er} janvier 2026 la représentation française au sein du Conseil d'EUROSLAG.

Réunion de l'Assemblée Générale d'EUROSLAG

Une réunion de l'ensemble des Adhérents de l'Association européenne des producteurs et opérateurs de laitiers sidérurgiques, EUROSLAG, s'est tenue en visioconférence le 24 novembre 2022. 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 conjointe des groupes de travail d'EUROSLAG s'est tenue, en distanciel, le jeudi 24 novembre 2022. Des groupes thématiques (réglementaire, technique et environnementale), mais également des sous-groupes techniques (expansion volumique, lixiviation, ...) ont été mis en place depuis 2021 pour faire suite à l'adoption de la stratégie Euroslag 2025, afin de promouvoir l'utilisation des laitiers en Europe.

Travaux d'EUROFER / EUROSLAG

Allocation CO₂ des laitiers sidérurgiques

Il existe aujourd'hui toujours des divergences au niveau de l'approche à retenir par les différents sidérurgistes européens devant traiter de ce sujet. Un groupe d'experts dédié a été mis en place par l'Association européenne EUROFER, au sein duquel des échanges réguliers se déroulent sur les avancées au sein des différents pays européens.

L'élaboration de la fiche de déclaration environnementale produit pour les laitiers de haut-fourneau granulés peut reposer, en fonction du choix des sidérurgistes, sur une méthode d'allocation économique ou physique. Ce choix est stratégique car la méthode retenue

devra s'appliquer à la fois aux produits (aciers), et aux co-produits générés par ce même process (laitiers).

D'un point de vue normatif, les travaux sur les règles de catégorie de produit (PCR) des produits aluminium et acier développés par le TC135 n'ont toujours pas abouti. La faute à un désaccord entre la méthode proposée pour les co-produits par le comité 135, basée sur l'allocation physique, et celle recommandée par le TC350, en charge des normes horizontales sur les déclarations environnementales des produits de construction, qui recommande que l'allocation économique soit la méthode de référence pour les laitiers de haut-fourneau.

REACH Ferrous Slag Consortium

La 14^{ème} réunion de l'Assemblée Générale du Consortium REACH sur les laitiers sidérurgiques (« Ferrous Slag ») s'est tenue en distanciel, le 24 mars 2022. La révision et la mise à jour du Chemical Safety Report (CSR) est actuellement le point central des travaux du Consortium.

Une mise à jour des statuts du Consortium a également été réalisée, afin de pouvoir tenir des réunions en distanciel, et d'ajuster les mécanismes de représentation pour réunir le Quorum et valider les résolutions.

Réglementation nationale et européenne

Utilisation des laitiers comme fertilisants

Le Règlement européen n°2019/1009 publié au JOUE le 5 juin 2019 couvrant l'usage de tous les fertilisants, y.c. les amendements minéraux basiques pour lesquels les laitiers sidérurgiques sont utilisés remplace définitivement l'ancien Règlement (CE) 2003/2003 depuis le 16 juillet 2022.

L'acte délégué 2022/0973 relatif à l'utilisation de sous-produits industriels (catégorie CMC 11) pour la fabrication de fertilisants a été publié au JOUE, le 24 juin 2022. Ce texte complète le règlement européen 2019/1009 concernant les matières fertilisantes et les supports de culture.

Cela signifie qu'à compter du 16 juillet 2022, des fertilisants à base de laitiers sidérurgiques peuvent être mis sur le marché, sous réserve qu'ils respectent l'ensemble des exigences du Règlement européen, y compris les spécifications techniques complémentaires décrites dans l'acte délégué CMC 11.

Au niveau national, le Ministère de l'Agriculture (MAAF) et la DGCCRF ont engagé depuis 2021 la rédaction d'un décret, dit « socle commun », visant à mettre à jour la réglementation actuelle sur les fertilisants, en intégrant les dispositions du règlement européen. Ce texte devait également apporter une mise à jour sur les modalités de demandes d'autorisation de mise sur le marché (AMM), et sur la sortie de statut de déchet (SSD) des matières premières secondaires qui servent à la fabrication des fertilisants. Il vise enfin à une meilleure articulation avec les normes d'application obligatoire actuellement en vigueur, qui devraient faire référence de manière harmonisée à cette réglementation pour ce qui concerne les critères d'innocuité à respecter.



Le CTPL suit avec attention la mise en place de cette réglementation, compte tenu des filières historiques en place dans le milieu agricole pour les laitiers sidérurgiques. Après une temporisation sur le dossier en 2022 liée à différentes raisons (élections, situation économique de la filière, priorités liées à la grippe aviaire ...), une nouvelle version de la réglementation a été soumise à consultation publique le 30 octobre 2023, pour une durée d'un mois.

Le projet de réglementation soumis à consultation est constitué de deux décrets et deux arrêtés interministériels. La maîtrise des contaminations des sols par les matières fertilisantes et supports de culture passe par deux leviers : l'instauration de teneurs limites en contaminants (critères d'innocuité) et une limitation des apports compte tenu de la fréquence et de la quantité des matières utilisées (flux). Les quatre projets de texte sont les suivants :

- Un décret prévoit des catégories différentes (A1, A2, B1 et B2) suivant les qualités agronomiques et d'innocuité au regard des usages qui peuvent y être associés. Il introduit des critères d'innocuité et de qualité agronomique communs, posant les bases des textes suivants.
- Un second décret fixe les responsabilités applicables aux metteurs sur le marchés et producteurs de matières fertilisantes et supports de culture. Il introduit également des périodes de mise en conformité transitoires en cas de changement dans la réglementation applicable.
- L'arrêté « innocuité » précise les seuils d'innocuité applicables par catégorie de matière et par contaminant (élé-

ments traces métalliques, composés traces organiques, micro-organismes pathogènes, inertes et impuretés). La définition de l'innocuité porte sur les qualités physico-chimiques et microbiologiques adaptées aux matières et en fonction des connaissances scientifiques actuelles. Cet arrêté définit les méthodes d'analyse, les critères de sortie du statut de déchet et ajoute des exigences pour le suivi de la qualité et de la conformité des matières.

- L'arrêté « flux » définit les fréquences et apports maximaux admissibles applicables aux utilisateurs et producteurs de matières fertilisantes et supports de culture lors de l'utilisation de ces matières fertilisantes.

D'un point de vue normatif, la révision de la norme NF U44-001 pour intégrer les laitiers de convertisseur criblés (< 4 mm) est officiellement 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.

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^{er} juillet 2020.

Pour les laitiers sidérurgiques, cette problématique ne concerne que les laitiers de haut-fourneau, fabriqués à partir de minerais de fer et de char-

bon. Les laitiers d'aciérie, eux, ne concentrent pas les radioéléments d'origine naturelle. Les concentrations d'activité connues pour les laitiers restent par ailleurs tout à fait acceptables pour leurs utilisations réglementaires en construction. Un guide de recommandations professionnelles a ainsi été rédigé en octobre 2023 et visé par l'IRSN afin de faciliter l'application des dispositions réglementaires relative à la caractérisation radiologique des laitiers sidérurgiques mis sur le marché de la construction en France.



Guide méthodologique sur l'acceptabilité environnementale des matériaux alternatifs en construction

Suite aux réflexions menées au cours des deux dernières années au sujet de l'harmonisation des guides traitant de la valorisation de déchets en technique routière et en aménagement, la DGPR a décidé de ne pas imposer de méthodologies, mais de renforcer la clarté des différents guides.

Historiquement, le Cerema a développé un certain nombre de méthodologies de valorisation de matériaux alternatifs en technique routière. Depuis quelques années le Cerema s'intéresse aussi aux valorisations possibles dans le cadre d'opérations d'aménagement (plateformes logistiques, lotissements, ZAC,

zones d'activités économiques etc.). Un projet de guide consacré à ces nouveaux usages pour les matériaux alternatifs était en discussion avec le Ministère, mais il a été mis en pause par le projet d'harmonisation de l'ensemble des guides existants, y compris celui du BRGM sur la valorisation des terres excavées en aménagement. Or, les deux méthodes Cerema/BRGM ne suivent pas tout à fait la même logique... Après de longues discussions, le projet d'harmonisation a été annulé et il a été décidé de conserver une séparation entre les méthodologies.

Ainsi, il a été demandé que chaque guide soit mis à jour afin d'y intégrer un encadré précisant son champ d'application, son approche méthodologique et la manière dont il s'articule avec les autres guides. Un document « aiguilleur » doit également être mis en place par la DGPR pour faciliter l'identification des guides et leur articulation.

Le Cerema a décidé de débiter ce travail par la révision du guide méthodologique relatif à la valorisation de matériaux alternatifs en technique routière, puis de celle de ses guides d'application, incluant la finalisation des deux projets de guide d'application en cours (sédiments et terres excavées) dont les travaux avaient été stoppés par le processus d'harmonisation.

Des réunions de travail entre le Cerema, le MTE et l'ensemble des parties prenantes ont également redémarré depuis le second semestre 2023 sur le guide méthodologique relatif aux opérations d'aménagement.

SRC - Schémas régionaux des carrières

Les régions françaises avaient l'obligation de mettre en place d'ici 2020 leurs schémas des carrières incluant les ressources minérales secondaires (ou « alternatives »). A cette fin, les laitiers sidérurgiques sont intégrés dans le processus pour les régions concernées. La plupart des régions ont ainsi bien avancé 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 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 sont multipliées en 2022/23, afin d'avancer dans l'élaboration des différents SRC.

• 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 2021 (2,8 Mt) ont été transmis à la DREAL des Hauts-de-France en vue de la préparation du dernier COPIL en octobre 2022. Des bilans des schémas sont en phase de rédaction et des modèles de production et de besoin sont en cours de configuration itérative. La cartographie des enjeux environnementaux est également en cours.

• 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 actualisé (2021) 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. Aucune réunion ne s'est tenue en 2022/23.

• SRC en région PACA

Les travaux du SRC initiés depuis 5 ans sous le pilotage de la DREAL PACA se sont achevés en 2022. Les orientations définitives du schéma ont été présentées, et une consultation administrative obligatoire a été lancée entre mars-mai 2022. La publication de ce SRC sera effective après l'approbation par le Préfet.

• SRC en région AuRA

Dans cette région, les travaux techniques se sont terminés fin 2021. L'approbation finale du SRC est effective depuis le 8 décembre 2021, par arrêté préfectoral (à l'adresse suivante) : <http://www.auvergne-rhone-alpes.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/20211208-ap-approbation-src-vs.pdf>

L'ensemble de la documentation technique concernant ce SRC peut être consulté à l'adresse suivante : <http://www.auvergne-rhone-alpes.developpement-durable.gouv.fr/schema-regional-des-carrieres-src-approuver5077.html>.

Normalisation

CEN/TC 51 - Ciment et liants hydrauliques

Que ce soit au niveau français ou européen, la sensibilité de l'ensemble de la filière est de plus en plus tournée vers les problématiques environnementales. Cela s'est traduit récemment par la mise en place de plusieurs groupes de travail avec des orientations en ce sens :

- Création d'un WG 19 sur la « décarbonation, les ressources, l'efficacité et la durabilité »,
- Création d'un groupe ad hoc de travail européen (dépendant du WG 6) sur la procédure d'évaluation de l'impact environnemental et sanitaire des nouveaux ciments.

Par ailleurs, cette impression est également renforcée étant donné les spécifications proposées dans les nouvelles normes de ce Comité :

- Norme prEN 197-6 relative aux ciments à base de matériaux de construction recyclés, et à l'incorporation croissante de matériaux alternatifs pour la fabrication des ciments,
- Une réactivation du WG14 relatif aux Liants Hydrauliques Routiers (LHR) a également été actée en 2022, en vue de réviser les normes existantes et de modifier les spécifications concernant l'incorporation de nouveaux constituants (principaux et/ou secondaires) permettant de réduire leur empreinte carbone.

CEN/TC104 - Bétons

Deux principaux points sont à signaler pour ces travaux : d'un côté la réactivation du groupe WG15 européen, relatif à l'utilisation des « Laitiers de haut-fourneau granulés moulus » comme additions bétons. Un nouvel animateur

français, M. Martin Cyr de l'Université de Toulouse, a été nommé et les travaux de révision de la norme EN 15167 ont redémarré pour mettre à jour en particulier des teneurs en sulfates, et les dispositions liées à l'empreinte carbone des laitiers.

Au niveau français, un groupe d'experts dédié aux solutions bas carbone (GE SBC) a été créé fin 2021. Il vise à répondre en particulier à certains aspects de la nouvelle réglementation RE 2020, aux approches ACV, et à un marché qui commence explicitement à demander de telles performances environnementales pour les bétons. Les travaux du GE devront réfléchir à l'intégration de ces aspects dans le calendrier des normes EN 206 et EN 206/CN. Une base normative et réglementaire est nécessaire pour gagner en objectivité. Pour avancer sur le sujet, six groupes thématiques ont été initiés :

- Task Force n°1 : nouvelles additions et nouveaux liants,
- Task Force n°2 : terminologie et indicateurs,
- Task Force n°3 : Liants, granulats et formulation des bétons selon l'approche prescriptive,
- Task Force n°4 : base de données SBC,
- Task Force n°5 : bétons non structuraux et bétons pour ouvrages provisoires,
- Task Force n°6 : contribution à la conception et au dimensionnement des solutions bas-carbone en béton.

Les travaux dans ce domaine sont donc très actifs, et des évolutions significatives sont attendues au cours des prochaines années. L'occasion sans doute pour nous d'y revenir plus en détail dans un prochain numéro de notre revue.

CEN/TC154 - Granulats

De nombreuses normes granulats sont bloquées pour des raisons de manquements au mandat et/ou au Règlement Produit de Construction (RPC). Selon la Commission Européenne (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.

Cependant, le TC 154 a décidé de poursuivre son travail. Il a ainsi été décidé de supprimer les sujets de travail (Work Items, WI) des projets de norme de spécifications, mais aussi de fusionner plusieurs des normes granulats – EN 12620 (Granulats pour béton), EN 13139 (Granulats pour mortier), EN 13043 (Granulats pour mélanges hydrocarbonés) et EN 13242 (Granulats pour matériaux traités aux liants hydrauliques) – en une seule norme EN 17555 dite « norme combinée ». Ce document sera scindé en deux parties : l'une mandatée (partie 1), et l'autre d'application volontaire (partie 2). Enfin, il a également été décidé d'annuler la norme EN 16236 (Évaluation et Vérification de la Constance des Performances (EVCP) des granulats) et d'en rapatrier son contenu dans la partie 1 de la nouvelle norme EN 17555. Le projet de texte a été envoyé à l'enquête CEN en milieu d'année. Des modifications ont été apportées au projet suite à l'enquête CEN. La norme ne sera soumise à une nouvelle enquête qu'après la réponse de la CE concernant l'acte délégué et la réponse au mandat (ajout des SDR).

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, mais ont été inévitablement ralentis par la crise sanitaire. Cependant, une version a été aboutie en milieu d'année 2022. La nouvelle version a été validée par l'Administration et publiée (en version projet) en mai 2023. Le GTR constitue un document fondamental pour la profession des laitiers !

Les travaux européens du WG7 progressent lentement, se heurtant parfois aux différences de pratiques dans les pays européens. La difficulté réside également dans la multiplicité des sources de matériaux alternatifs qui peuvent être utilisés en terrassements et la mise en forme de fiches synthétiques rendant compte des retours d'expérience existants. Cependant, un texte a été finalisé au second semestre 2023, et il pourra être prochainement mis à l'enquête au sein du TC 396.

Evènements

Le CTPL a participé à différents événements au cours de l'année 2023, l'occasion pour les permanents de l'association de présenter l'état des lieux de la valorisation des laitiers sidérurgiques produits en France :

- Les 17^{ème} **Assises des déchets** tenues les 27 et 28 septembre 2023 à Nantes, avec un atelier dédié à l'économie circulaire dans l'industrie du BTP,
- Le 72^{ème} **Congrès de l'industrie minérale** tenu du 3 au 6 octobre 2023 à Bordeaux, avec un atelier technique dédié à l'apport du recyclage dans la transition énergétique.

- La **Conférence Technique Territoriale** « Économie circulaire dans le BTP » tenue le 12 octobre 2023, organisée par la DTerMed du CEREMA à Aix-en-Provence,

- La **Journée Technique de l'AFOCO**, tenue le jeudi 23 novembre 2023 à l'INSA de Toulouse et dont la thématique était « Matériaux alternatifs : l'innovation au service de l'économie circulaire ».

Communication

E-Catalogue produits

Le E-Catalogue produit 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/>



SAVE THE DATE



12^{ÈME} CONFÉRENCE EUROPÉENNE SUR
LES LAITIERS SIDÉRURGIQUES EUROSLAG

**DES LAITIERS POUR LE FUTUR
LE FUTUR DES LAITIERS**

22 au 25 octobre 2024 - Bilbao (Espagne)

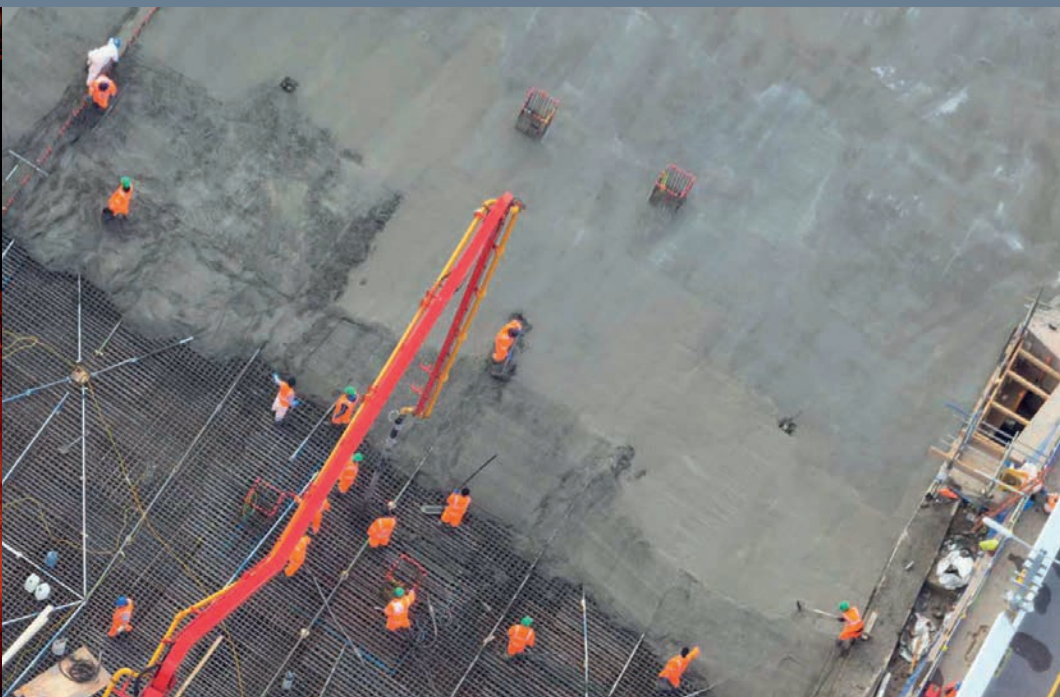


Comme à son habitude, le CTPL s'impliquera
et participera activement à ce rendez-vous
scientifique et technique européen

Appel à publications, posters, programme,
renseignements et inscription
info@euroslag2024.eu

www.euroslag.com

Acier et ciment : enjeux d'une production « Net-Zéro »



L'acier et le ciment entretiennent une relation synergique depuis près d'un siècle, c'est-à-dire depuis que les hauts-fourneaux sont au cœur de la production de masse d'acier. En effet, les hauts-fourneaux (HF) transforment le minerai de fer en fonte et en laitier (laitier de HF), ce dernier constituant un intrant important dans la fabrication du ciment, mélangé au clinker produit par les fours de cimenterie.

Dans le passé, les sidérurgistes ont produit eux-mêmes du ciment, jusqu'à ce qu'ils externalisent cette activité pour la confier à des pure players du secteur du ciment. Le laitier HF est alors devenu un sous-produit de la sidérurgie que les producteurs de ciment ont tenu à utiliser en raison de son prix attractif et parce qu'ils considéraient que son empreinte carbone était nulle.

L'acier et le ciment continuent à travailler en synergie. Aujourd'hui, les deux industries présentent à peu près la même empreinte carbone (6-7 % des émissions mondiales) et doivent la contrôler rigoureusement, c'est-à-dire converger vers un bilan net nul d'ici à 2050. Chaque secteur étant distinct, il s'efforce à sa manière de présenter des solutions permettant de réduire radicalement ses émissions. Ce que l'acier prévoit de faire peut donc nuire aux efforts du ciment pour réduire sa propre empreinte carbone. C'est ce que le présent article se propose d'analyser.

Production d'acier Net-Zéro : que deviendront les laitiers sidérurgiques et leur valorisation en tant que matière première secondaire ?

Les filières de production d'acier « Net-Zéro » au 21^{ème} siècle

Le secteur de l'acier a annoncé, *urbi et orbi*, qu'il deviendrait Net-Zéro entre 2040 et 2060, à peu près partout dans le monde [2]. La manière dont le secteur dans son ensemble s'organisera pour y parvenir est loin d'être claire, étant donné le battage médiatique dans lequel l'information est emballée. Les annonces des entreprises, des gouvernements, des associations professionnelles, des fournisseurs de technologies de process, des investisseurs et des scientifiques, exprimées dans des communiqués de presse, des pages web, des rapports étayés, des documents techniques et des communications lors de conférences, publiés littéralement par centaines au cours de ces dernières années, résonnent comme dans une chambre d'écho.

En Europe [3,4], on parle essentiellement de réduction directe à l'hydrogène (H_2 -DR), même si la production d'hydrogène « vert » était encore inférieure à 1 Mt en 2021 [5]. SSAB, ArcelorMittal, ThyssenKrupp Steel, Tata Steel Europe et Salzgitter ont tous annoncé leur intention de construire des démonstrateurs H_2 -DR ou des usines FOAK*, tout comme de nouveaux venus dans le secteur de l'acier, tels que H_2 Green Steel [6]. Si cette tendance devait être extrapolée à l'ensemble de la production d'acier, tous les hauts-fourneaux fermeraient, ce qui réduirait à néant la production de laitier de haut-fourneau disponible pour l'industrie du ciment.

L'avenir dans l'Union Européenne (UE) pourrait toutefois être un peu moins unilatéral mais également biaisé en faveur de l'hydrogène, car d'autres technologies sont à l'étude et des communiqués ont aussi annoncé leur mise en œuvre. Il s'agit d'utiliser dans l'UE davantage de ferrailles générées dans l'UE, principalement dans des fours électriques à arc (ArcelorMittal à Dunkerque et à Fos-sur-Mer), mais aussi de maintenir des hauts-fourneaux en activité, en les équipant de CSC (Captage et stockage du carbone) ou de CUC (Captage et Utilisation du carbone) pour neutraliser leurs émissions de CO_2 . La réduction-fusion fait également l'objet d'études pilotes, comme Hisarna Tata Steel à Ijmuiden et la réduction-fusion par plasma d'hydrogène à Voestalpine Donawitz. L'électrolyse du minerai de fer est étudiée à Maizières-lès-Metz, par ArcelorMittal Research, dans le cadre du projet européen SIDERWIN, auquel fait suite le projet VOLTERON [7].

Dans le reste du monde, l'importance donnée à l'hydrogène est moindre qu'en Europe et c'est un ensemble de procédés complémentaires qui est présenté dans leurs feuilles de route vers le «Net-Zéro», cf. la référence [2].

La figure 1 montre une projection de la production d'acier dans le monde au cours du 21^{ème} siècle en termes de part de marché des différents procédés complémentaires. Elle repose sur des hypothèses simples : le pic de production d'acier sera atteint d'ici 2100, la collecte de ferrailles se maintient à un niveau élevé, la production respecte l'objectif de Net-Zéro en 2050, en y arrivant linéairement auparavant, de nouveaux procédés émergent, comme le H_2 -DR et l'électrolyse du minerai de fer.

* First Of A Kind

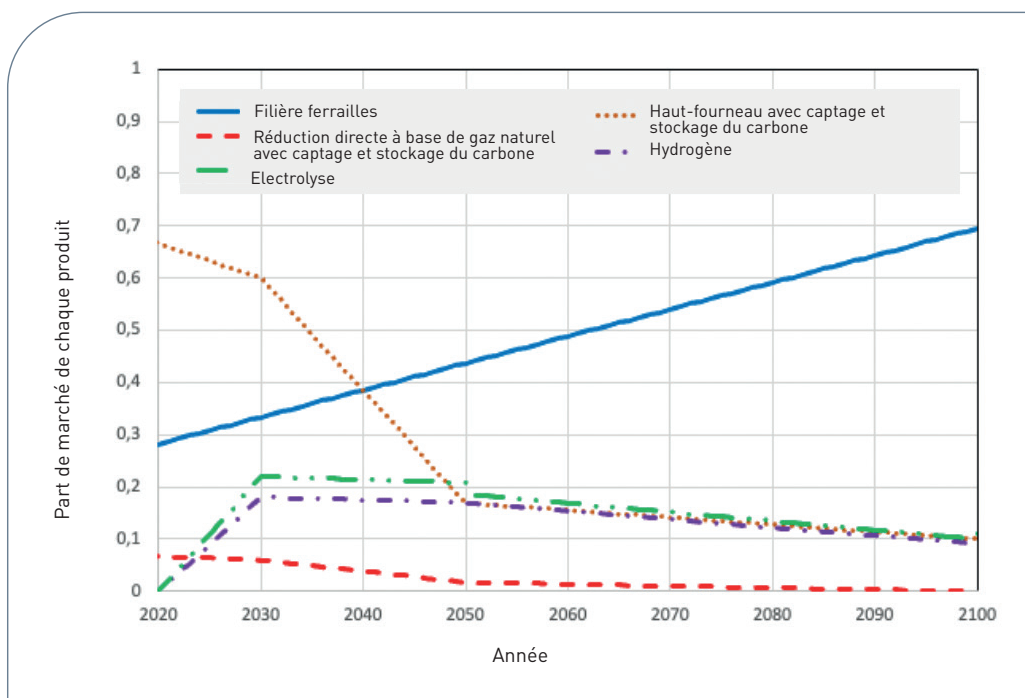


Figure 1

Évolution des parts de marché des procédés de fabrication de l'acier au 21^{ème} siècle.

Conséquences de la transition de la production d'acier vers le Net-Zéro sur les laitiers sidérurgiques

La transition sidérurgique majeure qui a démarré aura des conséquences profondes en termes de production et d'utilisation des laitiers.

Le phénomène principal, à long terme, est l'importance croissante que prendront les ferrailles recyclées dans la fabrication de l'acier, par rapport au minerai de fer. À terme, probablement après le pic d'acier, le monde se dirigera vers une circularité totale de l'acier. Il convient de noter que cette

tendance est due à la croissance de la consommation d'acier directement liée à la montée de la population et à la croissance économique, que nous avons extrapolée au-delà du ralentissement attendu de la production en Chine. Cela signifie que l'importance croissante de la circularité réduira les émissions de manière significative, sans pénalité carbone. Les déchets issus du minerai de fer, qu'il s'agisse de déchets miniers ou de déchets d'aciérie, diminueront au rythme de l'augmentation de la circularité. Ils devraient constituer une préoccupation majeure pour les utilisateurs de laitier de haut-fourneau, l'industrie du ciment, le génie civil et le verre, qui ont tous utilisé cette matière première secondaire comme moyen de circulariser leur propre production et de réduire leurs propres émissions de gaz à effet de serre. Notons toutefois que le phénomène ne se produira pas du jour au lendemain, puisque la projection porte sur l'ensemble du 21^{ème} siècle.

On peut noter néanmoins que les hauts-fourneaux et leur laitier ne disparaîtront pas complètement, même si leur part de marché diminuera. En effet, la croissance de la production garantira que les volumes de laitier resteront élevés. Toutefois, la production de ciment devrait également augmenter, de même que la construction de routes et la production de verre, de sorte que le laitier de haut-fourneau constituera une part décroissante de leurs ressources.

Les fours électriques à arc se multiplieront, à la fois pour fondre les ferrailles et pour fondre du DRI de haute qualité. Ils nécessiteront de l'électricité verte pour atteindre le Net-Zéro. Ces installations produiront aussi des laitiers, mais en quantités moindres que les hauts-fourneaux qu'ils remplacent, car ces laitiers ne proviennent plus de la gangue du minerai. De plus, ce laitier de four électrique ne sera pas adapté, *hic et nunc*, aux applications haut de gamme comme le ciment et, bien sûr, le verre. Il existe néanmoins des solutions pour changer cet état de fait, car ce laitier pourrait être transformé en laitier de haut-fourneau équivalent en complétant sa composition chimique, de préférence dans des réacteurs chauffés, une opération appelée « slagmaking », qui reste, aujourd'hui, essentiellement conceptuelle et nécessiterait davantage de R&D pour arriver à maturité.

Le statut des scories qui proviendront du procédé H₂-DR est plus complexe à imaginer, car des questions subsistent quant à la qualité des boulettes qui seront disponibles pour alimenter ce procédé. Aujourd'hui, les boulettes de qualité DR (réduction directe) ne sont pas produites en quantités suffisantes pour alimenter la croissance attendue du procédé H₂-DR et l'intention des sidérurgistes de l'UE est d'utiliser des boulettes pour haut-fourneau et donc de produire un DRI à haute teneur en gangue, qui devrait être fondu dans un four à arc spécial pouvant accepter de grands volumes de gangue, soit un SAF (Submerged Arc Furnace), un OSBF (Open Slag Bath Furnace), un OSBSF (Open Slag Bath Smelting Furnace) ou un ESF (Electric Smelting Furnace), et qui produirait de la

fonte qui devrait donc ensuite être affiné dans un convertisseur. Ce four électrique générerait du laitier, potentiellement équivalent au laitier HF, un sujet en cours d'examen, qui est actuellement étudié par la R&D [8].

Enfin, l'électrolyse du minerai de fer produirait également des déchets de nature complexe, en raison de la haute basicité de l'électrolyte dont ils seraient extraits. Cette question est également à l'étude.

Dans un monde parfait, cette présentation devrait maintenant analyser les stratégies du secteur du ciment aller vers le Net-Zéro [9] et examiner également d'autres secteurs qui lui fournissent des matières premières secondaires comme le fait la sidérurgie, par exemple les cendres volantes des centrales électriques au charbon. Cela pourrait l'objet d'un autre article, à venir.

Conclusions

Une transition majeure de la production d'acier est en cours : elle devrait se produire assez rapidement pour atteindre un objectif Net-Zéro comme celui du Green Deal de l'UE. Elle impliquera des transformations radicales de la fabrication d'acier et accélérera le changement dans un domaine où les processus ont été gelés depuis la seconde moitié du 20^{ème} siècle. Cette transition modifiera profondément la nature, la qualité et la quantité des laitiers sidérurgiques qui seront générés, ainsi que leurs filières de valorisation. Le secteur du ciment, en particulier, n'aura plus accès au laitier HF dans les mêmes proportions qu'auparavant.

Les projections qui sont ici présentées supposent que les objectifs « Net-Zéro » seront ciblés pour toutes les activités de la société et dans le monde entier. Il n'y aura plus d'empreinte carbone liée à l'acier, au laitier, ni à l'électricité après 2050. Il y aura cependant des coûts supplémentaires liés à un prix du carbone, dont on ne parle encore que dans des publications issues du monde des économistes [10].

Références

- 1 - J.-P. Birat, J.-M. Delbecq, E. Hess, D. Huin, «Slag, steel and greenhouse gases», Rev.Met. Paris, 66 1 (2003) 13-21
- 2 - J.-P. Birat, «Net-Zero transition in the steel sector: beyond the emphasis on hydrogen, did we miss any-thing?», Matériaux & Techniques 111, (2023) Number 2, Article Number 20,
- 3 - S. Cornot, «La sidérurgie européenne se prépare pour être à la pointe de la décarbonation», Notes de l'IFRI, IFRI, Paris, France, janvier 2023
- 4 - J.-P. Birat, «La décarbonation de la filière sidérurgique : les enjeux du défi de l'ACIER VERT», Annales des mines, Réalités industrielles, novembre 2022, 77-80
- 5 - Global Green Hydrogen Review 2022, IEA, September 2022
- 6 - Powering a new, clean industrial revolution, H2 Green Steel, <https://www.h2greensteel.com/>
- 7 - ArcelorMittal and John Cockerill announce plans to develop world's first industrial scale low temperature, iron electrolysis plant, ArcelorMittal website, 14 June 2023, <https://corporate.arcelormittal.com/media/press-releases/arcelormittal-and-john-cockerill-announce-plans-to-develop-world-s-first-industrial-scale-low-temperature-iron-electrolysis-plant>
- 8 - D. Algermissen, «“New” Slags for Cement Industry», in Conference «EU Green Steel, make it real», online, 30 May-5 June 2022
- 9 - A. Fernandez, Y. Leung, Technology Roadmap - Low-Carbon Transition in the Cement Industry, IEA and CSI, April 2018
- 10 - Pascal Criqui, Les coûts d'abattement en France, France Stratégie, Note de synthèse, mai 2023

Laitiers de four à arc électrique

Développement de nouvelles filières dans l'industrie des liants hydrauliques



Les laitiers de four à arc électrique (dits LAFE) sont des co-produits de la sidérurgie. Leur production tendra à augmenter considérablement dans les années à venir, notamment en Europe en raison du remplacement des hauts-fourneaux par la voie de « réduction directe – DRI-EAF ».

Contrairement au laitier de haut-fourneau granulé broyé, couramment utilisé comme substituant de ciment, il n'existe pas encore d'utilisation satisfaisante des LAFE dans l'industrie des liants hydrauliques bien que des essais aient été initiés, par le passé, pour l'utilisation des LAFE en granulats [1], en mélange de ciment [2, 3] ou en matériaux alcali-activés [4] après avoir été carbonatés [5] ou modifiés à l'état liquide [3, 6].

Ici, la structure minéralogique du LAFE tel que généré, a été étudiée pour définir le potentiel hydraulique du matériau comme constituant principal de liants hydrauliques.

Simon BLOTEVOGEL - Ecocem Materials
et LMDC, Université de Toulouse, INSA/UPS Génie Civil

Thomas WATTEZ, Roberta ALFANI, Laurent FROUIN - Ecocem Materials
Martin CYR - LMDC, Université de Toulouse, INSA/UPS Génie Civil

APPLICATION

Caractérisation minéralogique et premiers essais de réactivité cimentaire d'un laitier de four à arc électrique granulé par ArcelorMittal

Matériaux et méthodes

Les LAFE sont issus d'un site sidérurgique industriel d'Europe de l'ouest.

L'analyse chimique des échantillons a été réalisée par ICP-OES après fusion alcaline.

L'analyse au microscope électronique à balayage (MEB) est effectuée sur la fraction granulométrique 2 à 5 mm résinée polie, à l'aide d'un JEOL JSM 6380 équipé d'un détecteur EDS.

Les mesures de diffraction des électrons rétrodiffusés (EBSD) sont effectuées à l'aide d'un JEOL JSM 7100F TTLS LV au Centre Raimond Castaing à Toulouse.

L'analyse par diffractométrie de rayons X (DRX) est réalisée à l'aide d'un Brucker D8 équipé d'un Cu-anticathode en configuration Bragg-Brentano. La durée d'acquisition est de 203 minutes pour des angles de 4° à 100° , avec une taille de pas de $0,02^\circ$ et un couteau à hauteur variable en fonction de l'angle d'incidence. La quantification de phase (Q-DRX) est réalisée par raffinement Rietveld en utilisant CaF_2 comme étalon interne.

Pour les essais de résistance à la compression, les LAFE sont réduits en poudre au laboratoire à l'aide d'un broyeur à disques dont la finesse de mouture (d_{50}) est de 8 μm . Les fines ainsi obtenues sont utilisées pour la préparation des pâtes cimentaires dont les différentes compositions sont :

- (1) mélange à base de 50 % de LAFE et de 50 % de CEM I,
- (2) NaOH 10M à 70 % de LAFE activé et 30 % de verre sodocalcique classique.

Les rapports E/C sont respectivement de 0,5 et 0,3.

Résultats et discussion

La composition chimique des LAFE est présentée dans le tableau 1. Elle est conforme aux compositions typiques de la littérature. Fe est le constituant principal, suivi de Ca et Si. A noter que le rapport C/S (de 1,65) est équivalent à celui d'un laitier de haut-fourneau granulé broyé [7] ainsi que le rapport $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$. Cependant, les concentrations en Mn et en Cr, toutes deux jugées préjudiciables pour la réactivité du laitier de haut-fourneau granulé broyé, sont élevées.

	Fe_2O_3	CaO	SiO_2	MgO	Al_2O_3	Mn_2O_3	Cr_2O_3	TiO_2	Na ₂ O	K ₂ O
	wt%	wt%	wt%	wt%	wt%	wt%	wt%	wt%	wt%	wt%
LAFE	37.01	26.36	16.01	10.51	5.88	3.58	1.55	0.88	0.10	0.04
Am. Est.	43.13	14.58	10.81	14.24	2.62	7.84	3.39	1.93	0.22	0.09

Tableau 1

Composition chimique des LAFE par ICP-OES après fusion alcaline et composition estimée de la partie amorphe (Am. Est.) calculée à partir d'un bilan massique des minéraux par Q-DRX

L'analyse par MEB-EDS permet de cartographier la distribution des espèces chimiques dans le laitier. Elle montre une matrice majoritairement riche en silice avec des zones plus concentrées en Fe et Mn (Figure 1). Le magnésium est quant à lui réparti entre ces deux phases (Si- ou Fe-). L'analyse par Q-DRX (Tableau 2) montre que les zones riches en Fe sont principalement composées de magnésiowuestite. La matrice de silicate quant à elle, contient également des zones plus riches en magnésium, en aluminium et en calcium.

Dans cette phase, la présence d'Al et de Mg semble s'exclure mutuellement, de sorte que la phase minérale correspondrait à la gehlénite du côté riche en Al et aux $(Ca/Mg)_2$ -silicates de stœchiométrie variable comme la merwinite, la bredigite ou la monticellite de l'autre côté.

D'un point de vue quantitatif, l'analyse par Q-DRX (tableau 2) montre la présence d'environ 25% de $(Ca/Mg)_2$ -silicates, 13,1% de magnésiowuestite et 40% de matière amorphe. Il est à noter que les silicates de calcium contenant du Mg sont considérés comme beaucoup moins réactifs que les silicates de calcium libres de cette espèce.

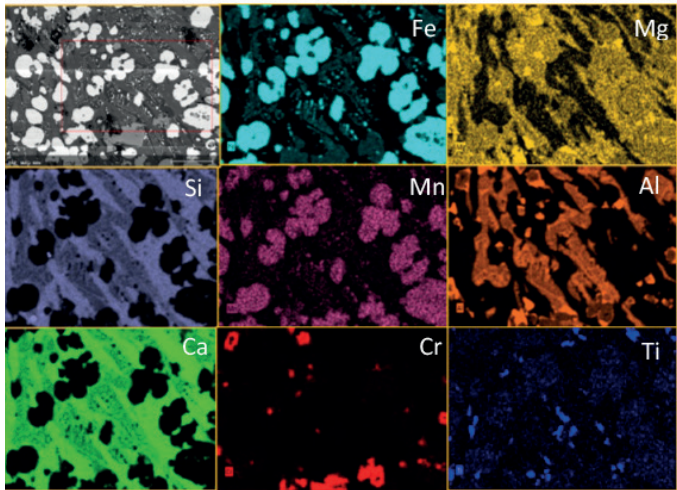


Figure 1
Cartographie élémentaire d'un échantillon LAFE poli.

	Mg-Wu	Geh	β -C ₂ S	C4AF	Bre	Fe ₃ O ₄	Mer	Fe ₂ O ₃	α -C ₂ S	Spi	Am
LAFE	14.1	7.2	4.6	2.0	12.7	1.8	6.9	1.4	2.4	2.4	44.4

Tableau 2

Analyse Q-DR avec noms abrégés des minéraux : magnésiowuestite (Mg-Wu, (Mg,Fe)O), gehlénite (Geh, Ca₂Al(AlSiO₇)), bredigite (Bre, Ca₇Mg(SiO₄)₄), merwinite (Mer, Ca₃Mg(SiO₄)₂), spinelle (Spi, MgAl₂O₄) et phase amorphe (Am).

Selon les mesures de diffraction des électrons rétrodiffusés (Figure 2), les zones riches en silicate donnent de bons signaux de diffraction, contrairement aux zones riches en Fe. Cela indique que ces dernières ne sont pas bien cristallines, elles représentent une partie importante du matériau amorphe quantifié par Q-DRX.

Ceci s'explique par un accroissement des teneurs en Fe et en Mg, et une diminution de celles en Ca et en Si dans la composition de la phase amorphe estimée à partir des données Q-DRX (tableau 1). De ces observations, il découle que, le contenu amorphe des LAFE pourrait ainsi avoir un potentiel réactif limité.

Les observations issues des essais de résistance à la compression sont présentés dans la figure 3. Le mélange CEM I – LAFE (50-50) a une résistance à la compression inférieure de moitié à celle de CEM I pure aux trois âges (1, 7 et 28 jours). Par rapport à un modèle de Bolomey prenant uniquement en compte la contribution du ciment, on constate qu'à court terme (1 jour et 7 jours), le LAFE n'est pas réactif, mais il semble développer une certaine réactivité à plus long terme (28 jours). D'autre part, l'activation par NaOH d'un liant à base de 70% de LAFE < 8µm (et 30% de verre sodocalcique classique) ne permet pas non plus de développer une résistance significative pour les éprouvettes fabriquées.

Par rapport à un modèle de Bolomey prenant uniquement en compte la contribution du ciment, on constate qu'à court terme (1 jour et 7 jours), le LAFE n'est pas réactif, mais qu'il semble progressivement développer une certaine réactivité à plus long terme (28 jours), sa contribution au modèle étant dans ce cas plus significative.

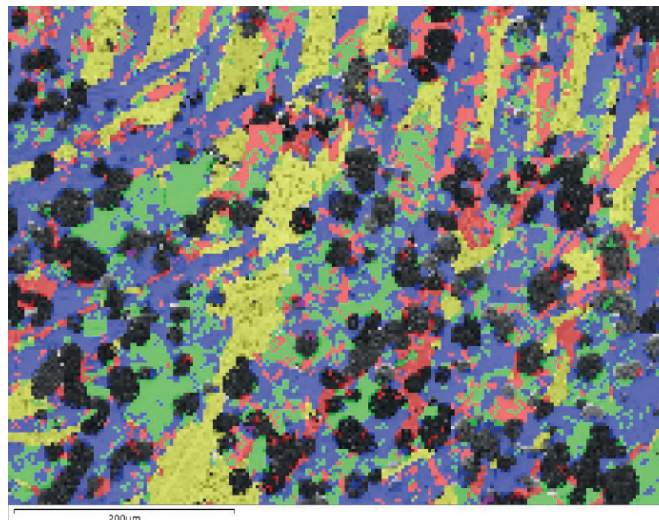


Figure 2

Cartographie EBSD d'un échantillon de LAFE, les zones colorées correspondent à la présence de différents minéraux : géhlénite (jaune), merwinite (bleu), brédigite (vert), larnite (violet), monticellite (bleu clair) et spinelle (rouge). Les zones noires marquent l'absence de signal de diffraction.

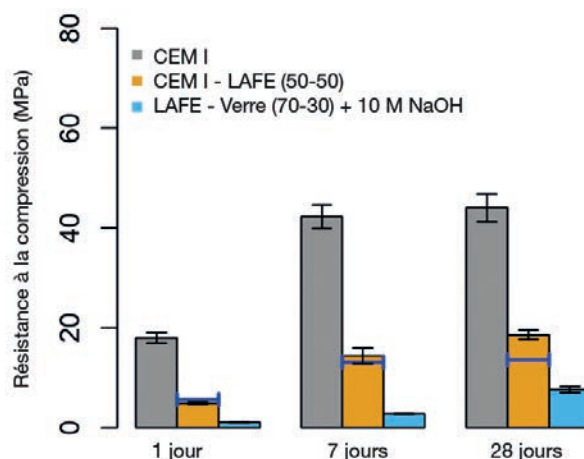


Figure 3

Résistance à la compression des pâtes de ciment contenant des LAFE < 8µm après 1, 7 et 28 jours. Les barres horizontales bleues indiquent les valeurs de la contribution du laitier au modèle Bolomey.

Conclusion

En conclusion, les laitiers d'aciérie de four électrique (LAFE) contiennent les apports nécessaires en calcium et en silicium en tant que matériau cimentaire. Néanmoins, leur potentiel hydraulique reste limité de par leur structure minéralogique, avec des phases de silicates proches de celles des laitiers de haut-fourneau granulés broyés. Ce potentiel semble pouvoir être libéré par une forte activation alcaline ou par une modification de la structure minéralogique (réduction de la teneur en Fe / amorphisation).

Références

1. Manso JM., Polanco JA., Losañez M., González JJ. Durability of concrete made with EAF slag as aggregate. *Cem Concr Compos.* 2006; 28 (6):528–534. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2006.02.008>
2. da Silva Magalhães M., Faleschini F., Pellegrino C., Brunelli K. Cementing efficiency of electric arc furnace dust in mortars. *Constr Build Mater.* 2017; 157:141–150. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.09.074>
3. Muhmood L., Vitta S., Venkateswaran D. Cementitious and pozzolanic behavior of electric arc furnace steel slags. *Cem Concr Res.* 2009;39(2):102–109. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2008.11.002>
4. Rashad AM., Khafaga SA., Gharieb M., Valorization of fly ash as an additive for electric arc furnace slag geopolymer cement. *Constr Build Mater.* 2021; 294:123570. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123570>
5. Kassim D., Lamaa G., Silva RV., de Brito J. Performance Enhancement of Alkali-Activated Electric Arc Furnace Slag Mortars through an Accelerated CO₂ Curing Process. *Appl. Sci.* 2022;12(3):1662. <https://doi.org/10.3390/app12031662>
6. Algermissen D., Ehrenberg A. Converting electric arc furnace slag into a (latent) hydraulic binder. 17th ed. *Cem Int.* 2019; 54–66.
7. Blotevogel S., Ehrenberg A., Steger L. et al. Ability of the R3 test to evaluate differences in early age reactivity of 16 industrial ground granulated blast furnace slags (GGBS). *Cem Concr Res.* 2020; 130:105998. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2020.105998>

Que sont devenus les laitiers en 2022 ?



Comme chaque année, le Centre Technique et de Promotion des Laitiers sidérurgiques (CTPL) a lancé en 2023 l'enquête nationale relative aux flux de laitiers sidérurgiques produits sur le territoire national en 2022. Cette enquête vise également à recueillir les données relatives à leurs principales filières d'utilisation par différents secteurs industriels.

Chiffres nationaux de la production de laitiers et de leur devenir en 2022

La consolidation des données (cf. tableau 1) fait apparaître une baisse de la production depuis 2019 autour de 4 millions de tonnes, liée directement à une baisse de la production d'acier, fortement dépendante des marchés de l'automobile (en crise) et de la construction (en stagnation).

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

Tout comme l'année 2021, 2022 n'aura pas été une année simple pour l'industrie sidérurgique, marquée par une réduction d'activité liée à la flambée du cours du gaz naturel en Europe, ainsi que du prix de l'électricité suite au déclenchement de la guerre russo-ukrainienne.

Les niveaux des stocks d'aciers en Europe sont élevés et les imports issus de l'Asie et de Turquie ne baissent pas. La profondeur des carnets de commandes en chute reste basse faute d'équilibre sur le marché européen.

Cette situation de l'industrie sidérurgique pour l'année 2022 conduit à une baisse de 11 % de la production des laitiers en France par rapport à l'année 2021 :

- Une baisse de 14 % de la production des laitiers de haut-fourneau granulés, et de près de 7 % de la production pour les laitiers de haut-fourneau cristallisés.
- Une production en baisse de plus de 10% pour les laitiers d'aciérie de conversion.
- Une baisse de 7 % pour les laitiers d'aciérie issus de la filière électrique.

TYPE DE LAITIERS		2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
LHF	LHF granulés	2 127	2 475	2 185	2 310	2 572	2 479	2 531	2 009	2 409	2 070
	LHF cristallisés	954	932	798	693	462	511	470	332	528	489
	LHF totaux	3 081	3 407	2 983	3 003	3 034	2 990	3 002	2 342	2 937	2 559
Laitiers d'aciérie de conversion		1 258	1 187	1 265	1 072	955	1 136	1 153	927	1 162	1 027
Laitiers d'aciérie électrique (aciers carbone)		607	503	442	420	423	461	396	272	421	408
Laitiers d'aciérie électrique (aciers inox et alliés spéciaux)		115	211	185	173	172	170	148	124	146	119
Total		5 061	5 308	4 875	4 668	4 623	4 757	4 699	3 665	4 666	4 113

Tableau 1

Synthèse des productions de laitiers en France entre 2013 et 2022 (en kt)

Laitiers de haut-fourneau

La production de laitiers de haut-fourneau s'établit à près de 2,6 millions de tonnes pour l'année 2022, issues des sites Arcelor-Mittal de Fos-sur-Mer (13) et de Dunkerque (59), ainsi que du site Saint-Gobain de Pont-à-Mousson (54). Le ratio entre la partie cristallisée (19 %) et celle granulée (81 %) confirme tout l'intérêt de vitrifier la grande majorité de la production compte tenu des filières industrielles avalées.

La figure 1 illustre que la totalité des tonnages produits en 2022 ont été valorisés et que certains flux issus 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 comme additions hydrauliques bas-carbone par le marché du béton.

En 2022, 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.

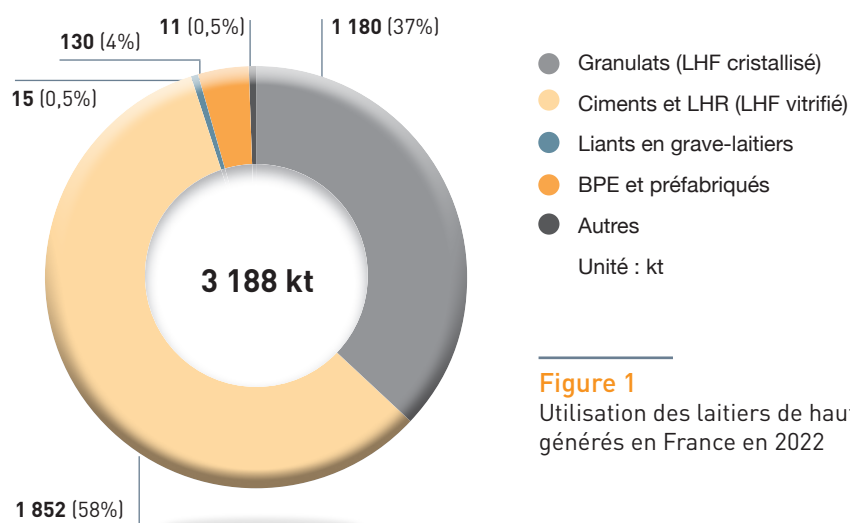


Figure 1

Utilisation des laitiers de haut-fourneau générés en France en 2022

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 un peu plus de 1,5 millions de tonnes pour l'exercice 2022, un volume en baisse de 10% par rapport à 2021.

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

Les laitiers d'aciérie de conversion (LAC)

Les laitiers de convertisseur à oxygène (appelés aussi laitiers LD) représentent 66 % des tonnages de laitiers d'aciérie produits en 2022 (près d'1 MT), en baisse de 1 point.

Il est à noter que 72 % des laitiers de convertisseur produits en 2022 sont valorisés dans différentes filières industrielles (TP, industrie des liants hydrauliques, agriculture ...). La mise en stock et le recyclage en interne sont de 20 %.

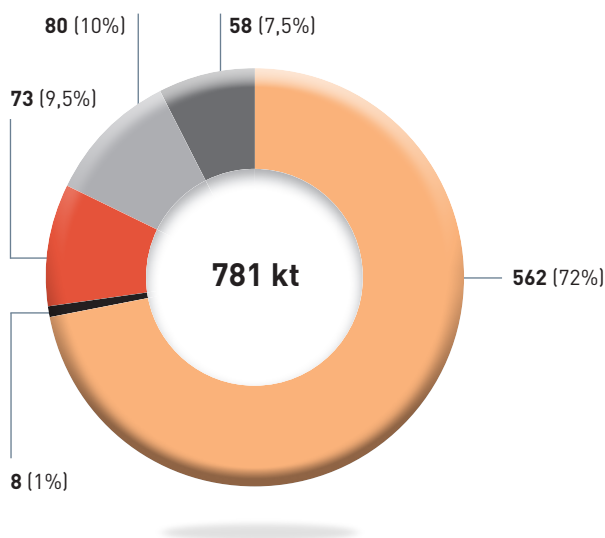


Figure 2

Orientation des laitiers d'aciérie de conversion générés en France en 2022

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

Ils représentent 26 % des tonnages de laitiers d'aciérie produits en 2022, soit 410 mille tonnes, en hausse de 3 points.

Compte tenu des propriétés géotechniques intrinsèques de ces laitiers, l'essentiel des tonnages (88 %) est utilisé comme granulats en technique routière. En 2022, la mise en stock continue de diminuer fortement pour ne représenter plus que 0,5% des tonnages. (-7 points par rapport à 2021)

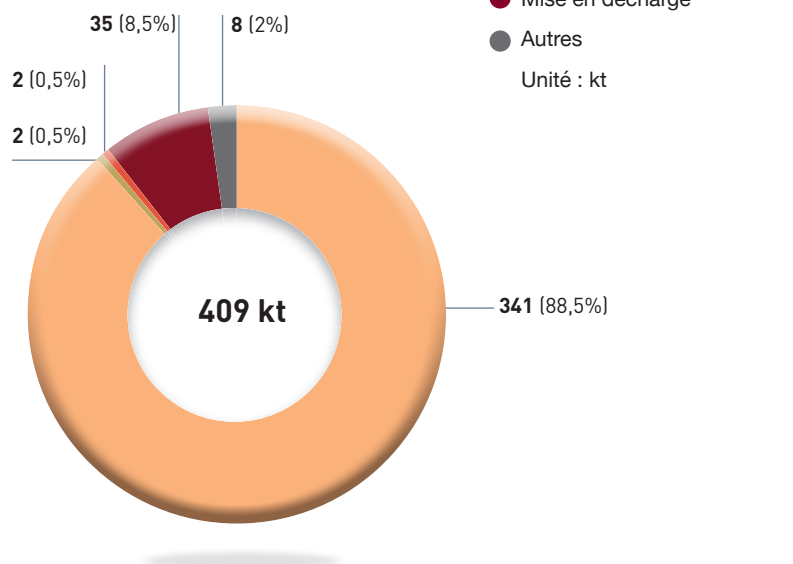


Figure 3

Utilisation des laitiers d'aciérie électrique issus de la filière carbone en 2022

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

Ils représentent en 2022, 8 % des tonnages de laitiers d'aciérie produits sur le territoire, soit environ 120 mille 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 :

- 60 % sont utilisés dans le BTP
- 31 % 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.

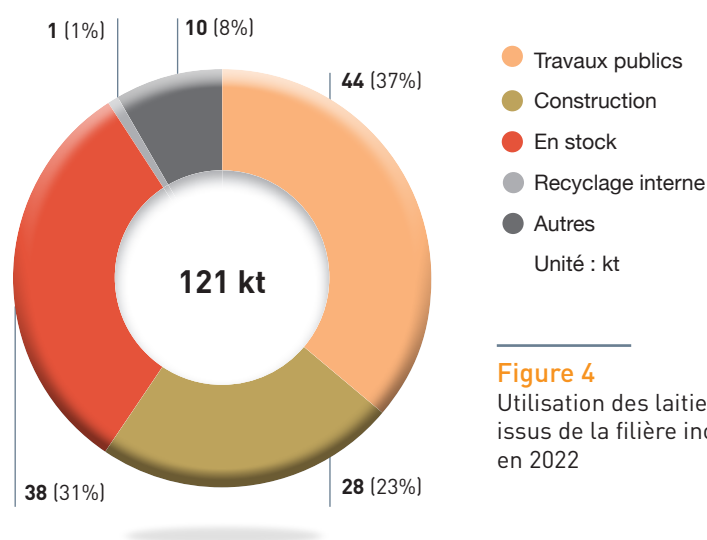


Figure 4

Utilisation des laitiers d'aciérie électrique issus de la filière inox et alliés spéciaux en 2022

Gestion des stocks historiques

A la fin de l'année 2022, les stocks de laitiers sidérurgiques 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^{ème} et XX^{ème} siècles – environ 11 millions de tonnes), ou encore les laitiers de convertisseur issus de la filière fonte (environ 14 à 15 millions de tonnes).

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 qui sont exploités de ces « crassiers », 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.

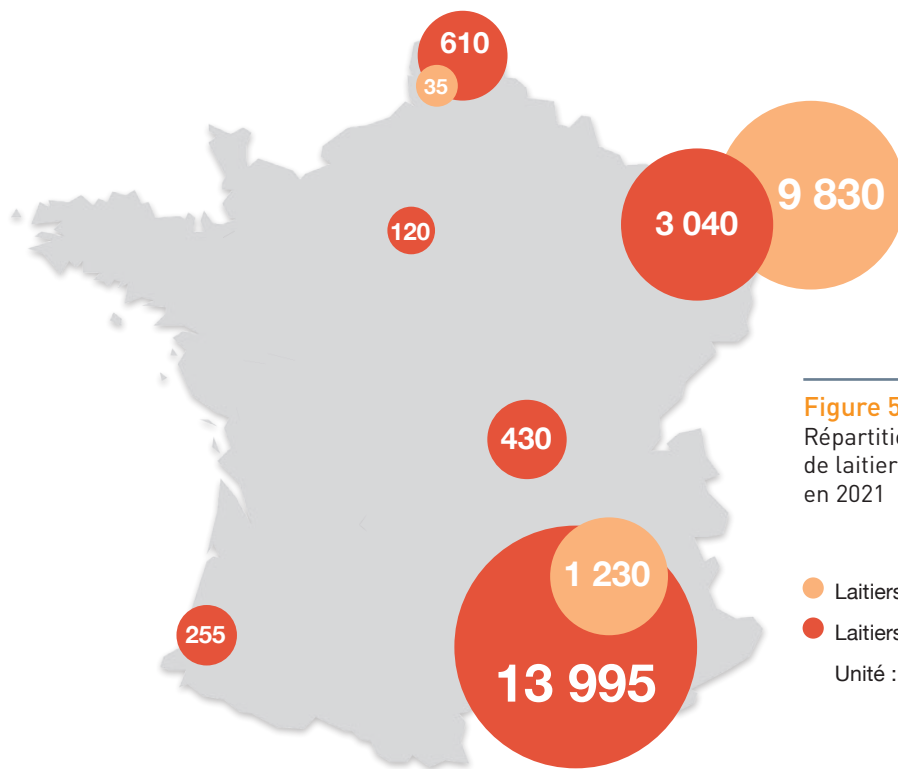


Figure 5

Répartition géographique des stocks de laitiers sur le territoire en 2021

● Laitiers de haut-fourneau

● Laitiers d'aciérie

Unité : kt

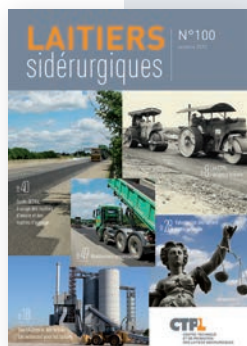
Pour plus d'information, vous pourrez évidemment retrouver en ligne la présentation synthétique de ces données sur le site internet du CTPL.

Rendez-vous à l'adresse suivante :

<https://www.ctpl.info/wp-content/uploads/2023/10/Stats-LHF-2022-2021.pdf>

<https://www.ctpl.info/wp-content/uploads/2023/10/Stats-laitiers-acierie-2022-2021.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° 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 granulat artificiel d'exception
 - Sous le béton, les laitiers
 - Sidmix® : liant hydraulique écologique et polyvalent pour matériaux routiers
- **Que sont devenus les laitiers en 2016**
Production et devenir des laitiers sidérurgiques en 2016 en France
Jérémie Domas : CTPL

N° 109 (Juin 2018)

- **Les laitiers sur 3 frontières**
9^{ème} conférence Euroslag
- **Radioactivité : les LHF aptes pour la construction**
La radioactivité naturelle des laitiers de haut-fourneau peut-elle être un frein à leur mise sur le marché comme matériau de construction ?
P. Gauje : ArcelorMittal France, Global Research and Development, Maizières Process
F. Hanrot : ArcelorMittal Luxembourg, European Procurement Organisation - By-Products Sales
M. B. Mokili, M. Bailly, I. Deniau : Laboratoire Subatech
- **LAFE : à chacun sa personnalité !**
Analyse comparative et propriétés de deux laitiers d'aciérie de four électrique en vue de leur utilisation dans des bétons hydrauliques
Amaia Santamaria, José Tomás San José, Javier Jesús González : UPV/EHU
Flora Faleschini, Carlo Pellegrino : DICEA-UNIPD

N° 110 (Décembre 2018)

• Laitiers moulus : de la fonte au béton

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

• Ouverture d'une nouvelle usine ECOCEM à Dunkerque

• Révéler et développer la valeur ajoutée des laitiers moulus

Projet Actislag : améliorer les performances des laitiers de haut-fourneau moulus dans les formulations du béton
G.Franceschini : ArcelorMittal - European Procurement Organization - By-Products Sales

• Que sont devenus les laitiers en 2017

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

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. Kana¹ - A. Seron¹ - F. Pereira^{2,3} - N. Menad¹ - S. Ho-Van^{2,3} - J.P. Baron⁴ :
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

N° 113 (Décembre 2021)

• Granulation du laitier de haut-fourneau : une nouvelle alternative

Influence du procédé de granulation (par voie sèche et humide) sur les propriétés hydrauliques du laitier de haut-fourneau

• Que sont devenus les laitiers en 2020

Production et devenir des laitiers sidérurgiques en 2020 en France
Shahinaz Sayagh : CTPL

N° 114 (Décembre 2022)

• Laitiers de haut-fourneau moulus

Règles de comptabilisation des émissions de CO₂ des laitiers de haut-fourneau granulés : nouvelles recommandations françaises pour la mise à jour des FDES

• Empreinte environnementale

Méthode et calcul de l'empreinte carbone des laitiers de haut-fourneau granulés par ArcelorMittal

• Que sont devenus les laitiers en 2021

Production et devenir des laitiers sidérurgiques en 2021 en France
Shahinaz Sayagh : CTPL





www.ctpl.info