

# LAITIERS sidérurgiques

N°104

mai 2015

page 6

**Actualaitiers**

page 22

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



Caractéristiques et apports des  
laitiers sidérurgiques en usages  
agricoles

page 8

**Avec les LAC,  
ça pousse !**

LES LAITIERS SIDÉRURGIQUES  
ET LEURS USAGES AGRICOLES :  
UN MARCHÉ PÉRENNE À POTENTIEL.

**CTPL**

CENTRE TECHNIQUE  
ET DE PROMOTION  
DES LAITIERS SIDÉRURGIQUES

# enlight



# Economie circulaire

## Les laitiers montrent l'exemple

L'économie circulaire... Tout le monde en parle, mais il y a longtemps que les laitiers sidérurgiques la pratiquent, dans le sens premier que peut avoir ce concept.

En effet, quoi de plus simple que de prélever des minerais de l'écorce terrestre, d'en extraire la seule fraction recherchée pour les besoins de la sidérurgie - le fer - et d'en restituer tous les autres constituants non directement utiles dans le sol. C'est le thème choisi pour ce numéro de Laitiers Sidérurgiques : l'usage des laitiers en agriculture.

En effet, les outils sidérurgiques tels que haut-fourneau, convertisseur ou four électrique, ne modifient que faiblement la composition du minerai d'origine : mises à part une présence de calcium plus élevée et une concentration plus forte, la proportion relative des autres éléments chimiques présents dans la matrice est identique à celle du minerai initial.

Ainsi que le démontre l'article de Marc Fixaris, cette restitution peut même être faite de façon suffisamment intelligente pour compenser certaines petites «erreurs» de la nature : c'est le cas des emplois en amendements agricoles où la basicité élevée créée au cours du process sidérurgique permet aux laitiers de «corriger» les sols naturellement acides et de les rendre ainsi plus favorables à certaines récoltes.

Si l'emploi de ces mêmes laitiers en tant que fertilisants a disparu, au moins en France, à la fin du XX<sup>ème</sup> siècle – avec les scories Thomas - Mary Provance-Bowley aborde, dans son article, un point qui, curieusement, a été soulevé à la même époque : les aspects bénéfiques de l'acide silicique sur les cultures. Cette forme de silicium, particulièrement présente dans les laitiers, facilement disponible et assimilable par les plantes, accentue tant leur résistance à certaines maladies que leur capacité à exploiter les éléments minéraux bénéfiques présents dans le sol. Cette découverte va, peut-être, remettre les laitiers sidérurgiques dans la liste des fertilisants recherchés par les agriculteurs.

Pour paraphraser quelqu'un de bien plus connu que moi : dans le sol ils étaient, dans le sol ils retourneront... Quel bel exemple d'économie circulaire !

Jacques Reynard  
*Délégué Général du CTPL*

page **6** **Actualaitiers**

page **8** **Avec les LAC,  
ça pousse !**



Face à une agriculture toujours à la recherche de meilleurs rendements tout en préservant une qualité suffisante des sols et dans le respect de l'environnement, les laitiers de conversion représentent un matériau d'amendement dont la valeur agronomique n'est plus à démontrer, mais que l'on a tendance à oublier un peu.

Ces laitiers présentent des caractéristiques intrinsèques qui participent au maintien d'un pH adapté des sols, à l'accroissement de leur fertilisation et à l'augmentation des rendements notamment grâce à l'absorption du phosphore. Ils contribuent également à l'apport d'oligo-éléments essentiels au développement des plantes et facilitent la rétention de l'eau dans le sol.

Cette filière de valorisation dans l'agriculture représente un fort potentiel pour les laitiers de convertisseur en France, pays dont l'activité agricole est particulièrement soutenue et présente sur tout le territoire.

*Marc FIXARIS  
ArcelorMittal B.S.M.E*

## Les laitiers au secours de l'agriculture !



Quel que soit le mode d'élaboration de l'acier dont ils sont issus, les laitiers sidérurgiques sont tous semblables dans leurs constituants principaux.

Sur le plan de leur composition chimique, ils présentent des similitudes avec la croûte terrestre qui est le médium permettant la filtration des eaux douces. Il est logique que les laitiers puissent être utilisés pour la filtration d'eau, le traitement des eaux usées, comme amendement pour la restructuration ou la modification des sols, ou encore comme fertilisants agricoles.

S'appuyant sur de nombreuses études réalisées notamment aux Etats-Unis, cet article fait le point sur les caractéristiques et les apports des laitiers quant à leurs usages agricoles.

De très belles perspectives de débouchés s'offrent ainsi aux laitiers qui contribueront très vraisemblablement dans le futur à résoudre les problèmes environnementaux et sociétaux actuels.

*Mary Provance-Bowley,  
Harsco Metals and Minerals*

### LAITIERS SIDÉRURGIQUES

69<sup>ème</sup> 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](http://www.ctpl.info)

#### Conception - Réalisation

BC Consultants :  
01 30 74 09 00

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

Crédit photos :  
CTPL, Fotolia

N° ISSN 1166 - 3138

Dépôt légal :

2<sup>ème</sup> trimestre 2015

## Fonctionnement du CTPL

### Réunions de l'AG et du CA du CTPL

La dernière réunion du Conseil d'Administration (CA) du C.T.P.L. s'est tenue le mardi 9 décembre 2014. A cette occasion, la programmation des actions techniques, réglementaires et normatives a été présentée et ratifiée pour la période 2015-2018.

Daniel Richard (Arcelormittal/BSME) ayant décidé de mettre un terme à son mandat d'Administrateur, c'est François Hanrot (Arcelormittal/BSME) qui a été proposé comme nouvel Administrateur de l'Association.

Les prochaines réunions du CA et de l'AG se dérouleront le 14 avril prochain.

## International

### Réunion des Groupes de Travail d'EUROSLAG

La dernière réunion de l'Assemblée Générale et des groupes de travail d'EUROSLAG s'est tenue au FEhS (Duisbourg, Allemagne) le mercredi 10 décembre 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 réunion de l'Association européenne des producteurs et opérateurs des laitiers sidérurgiques, EUROSLAG, se tiendra le mercredi 27 mai 2015 au FEhS à Duisbourg, afin d'échanger avec nos partenaires européens sur les problématiques relatives à la gestion des laitiers sidérurgiques. A cette occasion, le C.T.P.L. a été sollicité pour parler de la démarche de sortie de statut de déchet pour les laitiers sidérurgiques en France.

### Conférence EUROSLAG

La 8<sup>ème</sup> 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 innovantes en termes de gestion des laitiers.

Vous pourrez retrouver de plus amples informations à propos de cette manifestation :

- Sur notre site internet : [www.ctpl.info](http://www.ctpl.info)
- Sur le site de Voestalpine : <https://events.voestalpine.com/european-slag-conference>
- Sur le site officiel de EUROSLAG : [www.euroslag.com](http://www.euroslag.com)

### SlagFertiliser 2<sup>nd</sup> workshop

Le deuxième atelier de travail sur les laitiers en usages agricoles se tiendra à Vienne le 27 avril dans les locaux de l'Agence Autrichienne pour la Santé et la Sécurité Alimentaire (AGES). Dans le but de renouer avec les acteurs principaux de ce marché et de se faire connaître, le C.T.P.L. a répondu favorablement à l'invitation gracieuse qu'il a reçu de l'AGES et participera à ces travaux.

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

Les résultats des simulations réalisées sur les laitiers de haut-fourneau par application de la méthode par répartition MPSV préconisée par Voestalpine ont été présentés en comité restreint le 17 décembre 2014. Cette méthode est une méthode par répartition plutôt qu'une méthode classique d'allocation. Cette répartition est faite sur les seules quantités strictement nécessaires à la réaction concernée et pas les quantités excédentaires de la pratique réelle. L'empreinte environnementale ainsi obtenue semble préserver à la fois les intérêts de l'acier et ceux des laitiers de haut-fourneau.

Il a donc été décidé de se livrer au même exercice sur les autres types de laitiers avant de présenter la totalité des résultats en assemblée plénière du Comité Environnement, afin qu'il décide de la recommandation qu'il fera à la direction d'EUROFER.

## Réglementation nationale et européenne

### Valorisation des matériaux alternatifs : les «CoTITA» prennent le relai !

Après le succès de la journée d'échange organisée à Lyon en avril 2014 sous l'égide du Ministère en charge de l'Environnement, c'est au tour des CoTITA de prendre le relai en région afin d'assurer la promotion des outils mis en œuvre pour la valorisation des matériaux alternatifs en technique routière. Dans ce cadre, trois conférences sont organisées au cours des 3 prochains mois :

- **Mardi 19 mai 2015** : «Valoriser les matériaux alternatifs en technique routière en régions PACA et Languedoc-Roussillon»
- **CoTITA Méditerranée** (CEREMA, Aix-en-Provence),
- **Jeudi 4 juin 2015** : «Les matériaux alternatifs en technique routière» - CoTITA Centre-Est (CEREMA, Clermont-Ferrand),
- **Mardi 23 juin 2015** : «Valorisation des matériaux alternatifs en techniques routières» - CoTITA Ile-de-France (IFSTTAR, Marne-la-Vallée).

Les Conférences techniques interdépartementales sur les transports et l'aménagement (CoTITA<sup>1</sup>) sont un dispositif mis en place par l'Etat et l'Association des Départements de France (ADF) dans le cadre de la loi dite de décentralisation des activités liées à l'entretien du réseau routier.

Ces journées seront l'occasion de mettre en lumière les excellentes performances techniques et environnementales des laitiers sidérurgiques et les outils à disposition, permettant de fournir aux maîtres d'ouvrage, maîtres d'œuvre et entreprises, l'ensemble des prescriptions et des exigences opérationnelles relatives à leurs usages en technique routière.

### Non, les laitiers sidérurgiques ne sont pas des déchets !

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 et déposé en février 2014 un dossier de demande pour les laitiers sidérurgiques, en liaison avec les services de la DGPR du MEDDE.

En parallèle, le projet de loi sur la transition énergétique, adopté en première lecture à l'Assemblée le 14 octobre 2014, puis examiné et voté par le Sénat en mars 2015, vise dans son «Titre IV» à la lutte contre le gaspillage et la promotion de l'économie circulaire. La transition vers un modèle d'économie circulaire repose sur un principe de réutilisation des déchets comme ressources potentielles. Pour permettre ainsi aux déchets de redevenir juridiquement des produits tout en présentant des garanties environnementales suffisantes, les services du Ministère ont posé les principes pour qu'une matière ne soit pas reconnue comme déchet, ou alors qu'elle puisse sortir de ce statut de déchet après une opération de valorisation.

Alors oui, nous l'affirmons haut et fort, la majorité des gisements de laitiers sidérurgiques en France doivent perdre leur statut de déchet compte tenu du processus dans lequel la plupart des producteurs se sont engagés depuis de nombreuses années : la maîtrise et la génération d'une véritable filière de production d'un produit ! Une nécessité absolue pour lever les réticences administratives ou psychologiques encore existantes, pérenniser les marchés existants, et assurer l'économie des ressources minérales naturelles ...

## Normalisation

### CEN/TC 51 – Ciment et liants hydrauliques

La norme EN 13282-2 relative aux liants hydrauliques routiers à vitesse de prise «normale» est enfin en publication. Cette norme reconnaît enfin les laitiers d'aciérie de conversion comme constituants principaux de ces liants.

A ce titre, et dans un premier temps, il est possible de les utiliser à hauteur de 40% de la composition du liant.

Nous profitons de cette opportunité pour remercier la société SGA et tout particulièrement Michel Méasson pour leur contribution essentielle dans ces travaux dès 2008.

### CEN/TC104 – Bétons

#### WG15

Le WG 15 est toujours dans l'attente des résultats de l'étude menée par nos collègues allemands du FeHS quant à l'existence d'une possible corrélation entre certaines caractéristiques physico-chimiques des laitiers de haut-fourneau granulés et les performances des bétons obtenus avec ces mêmes laitiers utilisés en addition de type II.

Dès que ces résultats seront disponibles (automne 2015), une nouvelle réunion sera organisée afin de vérifier la possibilité (ou non) d'utiliser ces résultats pour définir des «classes» de laitiers granulés moulus dans la norme EN 15167-1.

#### Commission nationale «béton» - Groupe P18B/GE RE

Le groupe d'experts a commencé à collecter les données relatives aux bétons d'ingénierie réalisés pour des ouvrages spéciaux. Du fait de l'existence très récente de cette catégorie de bétons, les retours d'expérience sont, à ce jour, très peu nombreux.

Il est probable que la constitution d'une base de données exploitable prendra de nombreuses années avant de pouvoir servir de support à une demande d'intégration de ces bétons actuellement «hors norme» et nécessitant des études de validation spécifiques dans le cadre des bétons normalisés par la NF EN 206-1.

#### Problème de la validité des ETAs pour les aditions au béton

Les représentants du groupe de travail P18 C «béton et constituants», MM. DELORT et J.M. POTIER, ont assisté à la réunion organisée à Düsseldorf le 24 novembre 2014 en application de la décision 725 du CEN/TC 104.

Un projet de lettre est en cours de préparation afin de préciser les points suivants :

- une ATE est équivalente à une norme produit européenne, pour une addition qui déroge à cette norme ;
- L'ATE ne peut pas préjuger des conditions d'utilisation ;
- Pour être utilisé dans un pays particulier, l'ATE doit établir la conformité des conditions d'utilisation avec les dispositions nationales d'utilisation du pays concerné.

Cela impliquerait donc une révision systématique des dispositions nationales de la NF EN 206-1/CN à chaque fois qu'une nouvelle addition apparaît sur le marché français afin d'y décrire les conditions d'emploi sur le territoire national de cette nouvelle addition.

### CEN/TC154 – Granulats

#### Commission française du BN TRA Granulats – GT Enrochements

Le CTPL participe activement à la révision du fascicule de documentation FD P 18-662 (2005) qui fournit des recommandations sur les bonnes pratiques françaises en matière de performances attendues pour les granulats utilisés comme enrochements. Il décrypte plus particulièrement la lecture des normes européennes dans le domaine (NF EN 13383-1 et NF EN 13383-2), compte tenu de leur dernière mise à jour.

#### WG13 – Substances dangereuses réglementées émises par les granulats

Le WG13 s'est réuni le 11 février 2015 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 reste essaie d'anticiper la prise en compte de ces exigences pour les granulats, en particulier en déterminant la liste des substances dangereuses à prendre en compte pour les granulats, et comment peut se faire l'évaluation et la Déclaration de performances (DoP).

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

#### WG1 – Emission dans l'eau

Trois réunions intensives ont eu lieu en octobre et décembre 2014, puis janvier 2015 concernant l'élaboration de la procédure de détermination de l'émission de SDR vers les sols et les eaux pour les matériaux granulaires. Le principe de l'essai est un essai de percolation en phase ascendante, sur lequel l'ensemble des pays semble d'accord. Cependant, c'est sur les paramètres de cette procédure que les avis divergent fondamentalement, chaque pays souhaitant conserver ses acquis.

Trois approches divergent : Europe du Nord, Allemagne et France ; la France s'appuie sur le protocole existant sur les déchets (CEN/TS 14405), réalisé pour les laitiers dans le cadre du programme de caractérisation pour l'acceptabilité environnementale en technique routière. Cependant, l'impact de la France semble à ce jour trop limité pour faire passer l'ensemble de ses propositions et il est vraisemblable que le protocole qui aboutira sera légèrement différent.

# Avec les LAC, ça pousse !!

Face à une agriculture toujours à la recherche de meilleurs rendements tout en préservant une qualité suffisante des sols et dans le respect de l'environnement, les laitiers de conversion représentent un matériau d'amendement dont la valeur agronomique n'est plus à démontrer, mais que l'on a tendance à oublier un peu.



Ces laitiers présentent des caractéristiques intrinsèques qui participent au maintien d'un pH adapté des sols, à l'accroissement de leur fertilisation et à l'augmentation des rendements notamment grâce à l'absorption du phosphore. Ils contribuent également à l'apport d'oligo-éléments essentiels au développement des plantes et facilitent la rétention de l'eau dans le sol.

Cette filière de valorisation dans l'agriculture représente un fort potentiel pour les laitiers de convertisseur en France, pays dont l'activité agricole est particulièrement soutenue et présente sur tout le territoire.

### Un peu d'histoire...

Le monde agricole a fortement utilisé par le passé les scories Thomas générées lors de la conversion de la fonte en acier, préparée à l'époque à l'aide des minerais de fer locaux chargés en phosphore («minette» de Lorraine). Cette typologie de laitiers, produite dans le Nord Est de la France, en Belgique, au Luxembourg et en Allemagne était largement utilisée, bien connue et appréciée du monde agricole.

Dans chaque pays, chaque sidérurgiste possédait à l'époque son réseau de transformation et de commercialisation des scories Thomas. Cette structure s'articulait autour d'installations de broyage, un réseau de vente propre, une distribution sur le territoire national jusque dans les champs cultivés. Les installations de préparation des matières permettaient d'expédier ces laitiers en vrac ou conditionnés en sac suivant une stratégie marketing bien organisée basée sur des noms de marques dédiés à ces produits.

Dans les pays de l'Europe de l'Ouest, lors de l'arrêt de l'exploitation des minerais de fer locaux (fermeture de la dernière mine en Lorraine en 1997) et le démarrage de l'utilisation de minerais d'importation plus riches en fer et de meilleure qualité, les teneurs en phosphore obtenues dans les laitiers de convertisseur ont fortement baissé (passage des laitiers «phosphoreux» contenant 14-20% de  $P_2O_5$ , aux laitiers «hématite» contenant 1-2% de  $P_2O_5$ ). A partir de ce moment, les laitiers phosphoreux n'ont plus été produits en Europe de l'Ouest ; seule l'usine Arcelormittal de Termitau au Kazakhstan produit encore des laitiers de convertisseur avec des teneurs en  $P_2O_5$  significatives (4-7%). Néanmoins, les cultivateurs allemands, français, belges et luxembourgeois avaient pris l'habitude d'utiliser les laitiers phosphoreux ; ce matériau de qualité permettait d'enrichir les sols et de maintenir les rendements agricoles à un haut niveau de performance.

### Quel avenir sur ce marché pour les laitiers de convertisseur actuellement produits en France...

Les laitiers bénéficient encore aujourd'hui d'une image très positive auprès des agriculteurs qui ont conservé le souvenir de la qualité de ces matériaux pour l'amendement des sols. Les agriculteurs sont en particulier toujours attentifs aux avantages liés à l'utilisation des laitiers de convertisseur actuellement produits, en termes :

- de régulation du pH des sols (effet tampon) de par les teneurs en chaux et en magnésie des laitiers de convertisseur,
- de leur teneur en silice, et de ses effets sur le sol et la plante,
- de la présence d'oligo-éléments ( $P_2O_5$ , Mn, Zn, Cu, ...) disponibles pour la plante, et utiles pour sa croissance.

De par leur process de génération sous forme d'une lave industrielle en fusion à 1600°C, leur composition chimique globale (voir tableau suivant) entièrement minérale, et leur mode de refroidissement (mixte à l'air et à l'eau), les laitiers de convertisseur produits actuellement correspondent à une roche artificielle composée de silicates de calcium et d'oxydes de fer, de calcium et de magnésium.

**Tableau 1**

Composition chimique typique des laitiers de convertisseur (en %)  
(Guide SETRA – Octobre 2012)

CaO	40-60
SiO <sub>2</sub>	10-15
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1-5
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5-7
MgO	1-8
FeO	10-25
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,5-3

L'efficacité agronomique des laitiers de convertisseur a été démontrée depuis longtemps compte tenu de l'utilisation intensive des scories Thomas. Cependant, les études scientifiques liées à l'impact de l'utilisation des laitiers de convertisseur sur les champs cultivés se sont faites plus rares en France dès lors que les laitiers «phosphoreux» n'ont plus été produits au profit des laitiers de convertisseur dits «hématite». Outre l'avantage lié à la présence de chaux dans le laitier, les atouts complémentaires sont insuffisamment mis en avant pour le développement de ce marché ; c'est ainsi le cas pour la présence d'éléments comme la silice ou le phosphore, dont de nouvelles études scientifiques ont démontré l'aspect bénéfique lors de l'utilisation de laitiers sidérurgiques en agriculture.

C'est pourquoi malgré les modifications dans les propriétés et les performances des laitiers produits en Europe depuis les années 90, l'Allemagne a maintenu en activité un centre de recherche dédié à l'utilisation agricole des laitiers sidérurgiques. De fait, diverses études concernant l'utilisation de laitiers sidérurgiques présentant des propriétés adéquates pour un usage agricole ont été menées au sein du centre de recherches ArGeHK (Arbeitsgemeinschaft Hüttenkalk e.V.), qui, ces vingt dernières années, a réalisé des études de terrain directement sur des champs cultivés.

Ces connaissances sont aujourd'hui très utiles pour alimenter les autres pays européens intéressés par le développement de ce marché. Ces compétences ont également permis de développer en Allemagne cet usage et de disposer d'un encadrement par une norme nationale.

En France, l'usage agronomique des laitiers sidérurgiques repose essentiellement sur les teneurs en chaux, afin de garantir le maintien du pH des sols. Ainsi, les bonnes pratiques nationales sont actuellement encadrées par les exigences décrites dans la norme NF U44-001 Amendements minéraux basiques - Dénominations et spécifications (avril 2009).

## Caractéristiques des laitiers sidérurgiques utilisables en agriculture

### Exigences géotechniques normatives

Les laitiers sidérurgiques, et tout particulièrement les laitiers de convertisseur, sont en conformité avec les exigences normatives qui régissent le choix des amendements agricoles.

L'utilisation des laitiers d'aciérie de conversion en agriculture est couverte en France par la norme NF U44-001 sous les classes IV type 11 et V type 14. La classe IV type 11 permet une utilisation directe des laitiers de convertisseur (moulus) ; la classe V type 14 permet une utilisation de fines de laitiers de convertisseur (moulues) en mélange avec d'autres matières décrites dans la norme.

Cette classification définit en priorité la granulométrie des matériaux à produire et à mettre sur le marché. Ainsi le laitier de convertisseur élaboré doit respecter les granulométries suivantes :

- 75% de passant à 0,16 mm,
- 96% de passant à 0,63 mm,

Si on se réfère à la classe granulométrique requise par la norme, la fraction correspondante du laitier de convertisseur utilisable en agriculture s'intègre alors dans un processus de préparation de différentes classes granulométriques destinées à différents marchés d'ores et déjà identifiés. Le diagramme suivant (tableau 2) détaille, pour un site sidérurgique intégré produisant des laitiers de convertisseur, la répartition des fractions granulométriques élaborées en fonction des usages.

**Tableau 2**

Filières de valorisation des laitiers de convertisseur en fonction des granulométries produites

		RÉGULATION DU PH DES SOLS		GRANULATS ALTERNATIFS POUR LA CONSTRUCTION	GRANULATS POUR LES MÉLANGES BÉTONS	ENROCHEMENTS UTILISÉS EN MER
		LIANT HYDRAULIQUE ROUTIER				
GRANULOMÉTRIE		0 <-> 200µm	200 <-> 650µm 200µm <-> 3,15mm	0-4mm 0-6mm 6-10mm 0-31,5mm	6 <-> 10mm	3 <-> 35mm 45 <-> 180 m
MARCHÉS		<u>Liant hydraulique routier</u>  <u>Stabilisation des sols</u> <u>Agent de chaulage pour le marché agricole</u>  > Fines obtenues principalement par broyage	<u>Agent de chaulage pour le marché agricole</u>  > Granulométries liées aux normes par pays	<u>Usages en constructions routières et aménagements urbains</u>  > Activité gérée en sous-traitance > Volumes importants/gestion de la chaux libre	<u>Laitier d'aciérie stabilisé pour la confection de bétons lourds</u>  > Blocs de béton pour la protection des côtes (granulats LAC à AM Gand)	<u>Laitiers de convertisseurs utilisés en mer</u>  > Protection des côtes et des digues
VOLUMES		10-50 Ktonnes/an	20-100/150 Ktonnes/an	100-300 Ktonnes/an	10-30 Ktonnes/an	30 Ktonnes/1 Mtonnes par projet

## Process d'élaboration des laitiers de convertisseur pour usage agricole

Suivant que les laitiers sidérurgiques sont vendus en Allemagne ou en France, la norme nationale applicable va imposer des granulométries différentes à respecter.

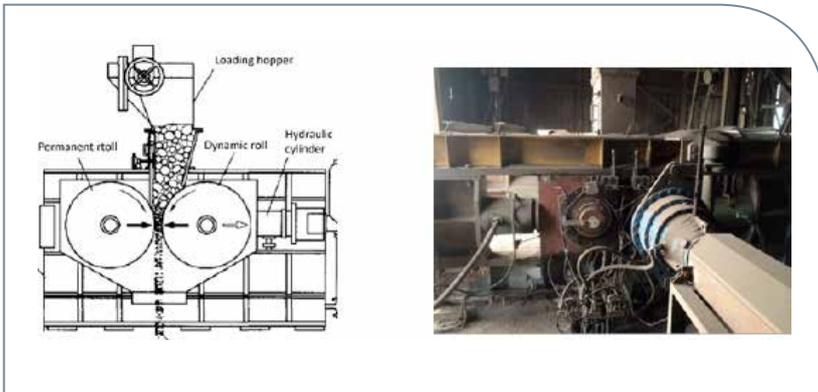
- En Allemagne, la norme autorise l'épandage d'un produit criblé entre 3 et 4mm, et un produit final qui devra respecter la répartition granulométrique suivante :

- 97% de la matière inférieure 3,15 mm,
- 40% de la matière inférieure à 0,315 mm.

Dans ce cas de figure, le process d'élaboration consiste à réaliser des campagnes de criblages à l'aide d'un tamis à 4mm. Les fractions fines ainsi criblées au sein des

usines sidérurgiques peuvent être stockées en vrac en plein air, avant d'être reprises pour être transportées et épandues. L'avantage des laitiers d'aciérie de convertisseur stockés en plein air avec cette granulométrie réside dans le fait que l'eau de pluie va réagir avec la chaux libre présente dans le laitier pour former une croûte de protection à la surface du tas qui sera cassée lors de la reprise des matériaux en stock. Cette matière sera alors directement chargée sur des camions bennes.

- En France, la norme NF U44-001 définit également très précisément la granulométrie à obtenir et exige un produit beaucoup plus fin, qui ne peut généralement être obtenu qu'après mouture dans un broyeur (à rouleaux par exemple, figure 1) dédié.



**Figure 1**  
Broyeur à rouleaux

L'objectif de cette phase de broyage est de broyer à moins d'1 mm afin que le mélange obtenu respecte la répartition exigée par la norme, à savoir : 96% < 0,63 mm et 75% < 0,16 mm.

Pour les pays qui ne disposent pas encore de norme ou de réglementation spécifique pour les amendements, les démarches engagées auprès des autorités compétentes pourront s'appuyer sur les expériences existantes depuis des années en France et en Allemagne.

## Propriétés et caractéristiques des laitiers de convertisseurs destinés à l'usage agricole

Les laitiers de conversion présentent des caractéristiques intrinsèques particulièrement intéressantes pour leur utilisation en usage agricole, leur permettant ainsi d'être un matériau particulièrement adapté pour l'amendement des sols. A la base, l'agriculteur cherche à la fois à augmenter ses rendements, tout en maintenant une qualité des sols suffisante. Plusieurs facteurs apparaissent donc nécessaires et optimisés par l'addition de laitiers de convertisseur.



Plus de nutriments absorbés :  
**P, Mg, N, Ca, Zn, Cu, K, Co, S**

## La teneur en silice (SiO<sub>2</sub>)

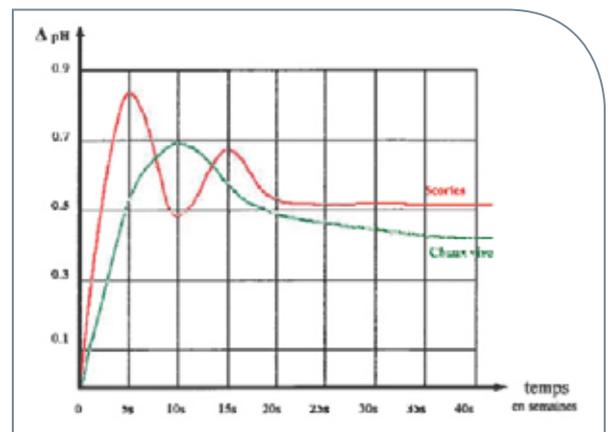
Les laitiers de convertisseur renferment de la silice soluble qui agit à différents niveaux, à la fois sur le sol et sur la plante. Les effets observés (études INRA/ArGEHK) sont les suivants :

- agrégation des particules fines du sol,
- aide à la mobilité et à l'assimilation d'oligo-éléments,
- maintien d'un niveau de pH adapté dans le sol,
- maintien ou intensification de l'activité microbienne, en vue de l'amélioration de la fixation de l'azote,
- action sur la rigidité de la plante,
- augmentation de la résistance aux maladies fongiques,
- augmentation des rendements grâce à l'absorption de phosphore.

Ces effets sont parfois combinés par l'action conjointe de la teneur en silice et du phosphore.

## Influence de l'addition de laitiers de convertisseur sur la structure des sols

L'efficacité agronomique d'un laitier sidérurgique dépend en particulier de sa valeur neutralisante (VN), qui est fonction des teneurs en chaux (CaO) et en magnésie (MgO) contenues dans le laitier<sup>1</sup>.



**Figure 2**

Variations de pH du sol sous l'effet de l'eau (durant 40 semaines)  
Comparaison des effets de l'addition de chaux vive et de laitiers de convertisseur pour une dose de 500 CaO ou CaO eq sur un sol de Boulbène (sol limoneux acide)  
Travaux réalisés par le laboratoire C.A. de Limoges en 1989

1 - VN = CaO + (1,4 x MgO)



## Apport d'oligo-éléments pertinents pour les plantes et les sols

La capacité d'échange cationique (CEC), majoritairement saturée par la libération d'ions calcium ( $\text{Ca}^{2+}$ ) dans le cas des amendements par du laitier de convertisseur, va permettre d'accroître la fertilisation du sol. En effet, dans les sols instables (sols limoneux pauvres en matière organique et en argile), le calcium solubilisé joue un rôle essentiel non pas en liant la matière organique avec les argiles, mais en régulant la mobilité des métaux (chéluviation), dont celle du fer, impliqué dans les liaisons organo-minérales.

Dans les sols ayant développé de telles liaisons, le chaulage améliore donc significativement la stabilité structurale. Les éléments minéraux fertilisants ainsi retenus dans les sols pourront par conséquent être plus facilement absorbés par la plante.

Enfin, l'addition de laitier contribuera également à augmenter la résistance du sol à la pluie et à l'érosion. L'érosion des sols et le lessivage de certaines parcelles sous l'effet de pluies violentes et abondantes accroissent significativement la perte de parcelles cultivables, ce qui reste un problème très important pour les exploitations agricoles.

La composition chimique naturelle du sol va directement déterminer l'acidité de ce sol. Les sols calcaires seront rarement acides, au contraire des sols argileux. Néanmoins, il existe une tendance naturelle des sols à devenir acides lorsqu'ils sont cultivés ; en effet, lorsque les plantes (telles que les céréales) sont cultivées, elles absorbent les éléments basiques nécessaires à leur croissance tels que le Ca, le Mg, ou encore le K.

En parallèle, les agents fertilisants participent également au renforcement de l'acidité du sol, en particulier dans le cas des fertilisants azotés.

L'amendement des sols par les laitiers de convertisseur va contribuer directement à la régulation du pH, du fait de sa valeur neutralisante. En complément, suivant la composition des laitiers de convertisseur considérés, les apports en phosphore et en oligo-éléments constitueront un atout non négligeable sur la valeur agronomique du produit.

Le tableau suivant illustre les apports fertilisants concernant le laitier de convertisseur de l'usine d'ArcelorMittal Fos-sur-Mer.

PHOSPHORE ET OLIGO-ÉLÉMENTS	$\text{P}_2\text{O}_5$	MgO	Zn	Cu	Mo
Quantité moyenne apportée au champ pour une tonne de laitier de convertisseur épandue	10 à 20 kg	~62 kg	16 g	15 g	< 33 g

**Tableau 3**

Exemple des apports fertilisants par tonne de laitier de convertisseur épandue

## Valeurs limites en métaux lourds imposées par les normes pour l'épandage agricole

Les réglementations françaises et allemandes imposent des valeurs limites pour les teneurs en métaux lourds. D'un pays à l'autre, les normes diffèrent et les réglementations nationales applicables en France et en Allemagne sont fournies dans les tableaux suivants.

### VALEURS LIMITES À RESPECTER EN FRANCE

France NF U 44-001	
<b>MgO + CaO</b>	40%
<b>Hg</b>	<0,3mg/kg
<b>Zn</b>	<530 mg/kg
<b>Pb</b>	<22 mg/kg
<b>Cu</b>	<63 mg/kg
<b>Cd</b>	<5 mg/kg
<b>As</b>	<56 mg/kg
<b>Cr</b>	<1200 mg/kg
<b>Mo</b>	<33 mg/kg
<b>Ni</b>	<350 mg/kg
<b>Se</b>	<1 mg/kg

### VALEURS LIMITES À RESPECTER EN ALLEMAGNE

	Valeur limite en mg/kg ou autre unité spécifiée
<b>Hg</b>	1
<b>Zn</b>	5000
<b>Pb</b>	150
<b>Cu</b>	900
<b>Cd</b>	1,5
<b>As</b>	40
<b>Cr total</b>	-
<b>Cr VI</b>	2
<b>Mo</b>	pas de limite spécifiée
<b>Ni</b>	80
<b>Se</b>	pas de limite spécifiée
<b>TI</b>	1

#### Tableau 4

Teneurs maximales en métaux lourds déterminées par les normes française et allemande.

Références de la norme allemande :  
«Verordnung über das Inverkehrbringen  
von Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen,  
Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln  
(Düngemittelverordnung - DüMV) - 05/12/2012»

En France, la teneur en chrome total (Cr) du laitier utilisé en agriculture est un paramètre déterminant pour leur usage. Elle va influencer significativement les quantités épandues sur les champs :

- Pour une teneur en Cr inférieure à 800 mg/kg de matière sèche, 100% du laitier peut être épandu pour un dosage usuel de 1,5 tonne par hectare,
- Pour une teneur en Cr comprise entre 800 et 1200 mg/kg de matière sèche, la quantité de laitier épandue à l'hectare diminue et sera calculée pour rester en dessous de la quantité totale maximale de chrome ajoutée avec le laitier,

- Pour une teneur supérieure à 1200 mg/kg de matière sèche, l'épandage agricole des laitiers sera interdit.

La norme française se base sur la teneur en chrome total des amendements ; cependant, l'impact environnemental est principalement lié au chrome hexavalent libéré. Pour les laitiers de convertisseur, il est important de noter que le processus même de génération des laitiers au sein du convertisseur (insufflation d'oxygène) est tel que tout le chrome potentiellement présent se trouve sous sa forme trivalente (CrIII), très peu mobile (Spinelles).

L'Allemagne a légiféré en se basant sur la distinction entre la teneur en chrome total et la teneur en chrome hexavalent. De fait, la réglementation impose une limite pour les amendements qui est basée sur la teneur en chrome hexavalent (CrVI), avec une valeur limite imposée à 2 mg/kg.

Des vérifications sont aussi faites au niveau des PFT (Tensioactifs perfluorés), limite fixée à 0,1mg/kg et les DTE (Dioxine + PCB), limite fixée à 30ng WHO TEQ/kg.

Cependant, à l'avenir, la réglementation européenne tend vers une harmonisation des pratiques et définira dans le futur les valeurs limites à respecter dans chaque pays d'Europe.

## Caractéristiques pertinentes pour les agriculteurs

Dans tous les pays où les laitiers sidérurgiques sont utilisés en agriculture, les principales caractéristiques mises en évidence pour les agriculteurs sont les suivantes :

- Pourcentage en masse d'oxyde de calcium (CaO),
- Pourcentage en masse d'oxyde de magnésium (MgO),
- Valeur neutralisante :  $CaO + 1,4 \times MgO$ ,
- Autres éléments intéressants :
  - Pourcentage en masse de phosphore sous forme de  $(P_2O_5)$ ,
  - Pourcentage en masse de silice ( $SiO_2$ ),
  - Pourcentage en masse de manganèse (Mn),
  - Eventuellement teneurs en oligo-éléments zinc (Zn) et cuivre (Cu).

Dans tous les cas de figure, c'est la biodisponibilité des éléments qui constituera le paramètre déterminant pour l'agriculteur. Par ailleurs, le choix de l'agent de chaulage se fera en se basant sur trois critères : le pH du sol, la rapidité de correction du pH attendue par l'agriculteur et le coût de l'unité de valeur neutralisante.

## Développements scientifiques récents et études effectuées en plein champ. Evaluation de l'impact sur les sols et les plantes

Les études détaillées dans ce paragraphe ont été réalisées au sein de l'Institut de recherches agricoles Kamperhof à Mülheim an der Ruhr, sous la coordination du Dr Martin Rex<sup>2</sup>.

Cet institut de recherches organise et anime un réseau d'échange et d'idées en coopération avec des organismes agricoles, des instituts scientifiques, différentes entités commerciales et les coopératives dans le domaine des pratiques agricoles.

Les connaissances et l'expérience générées passent également par des tests pratiques en plein champ ou sous serre, des contrôles des matières fertilisantes proposées, ainsi que la surveillance des besoins du marché et de la croissance des plantes.

Les études de terrain mises en œuvre au sein de ce consortium permettent de tirer plusieurs enseignements quant à l'intérêt de l'usage des laitiers de convertisseur en amendement agricole.

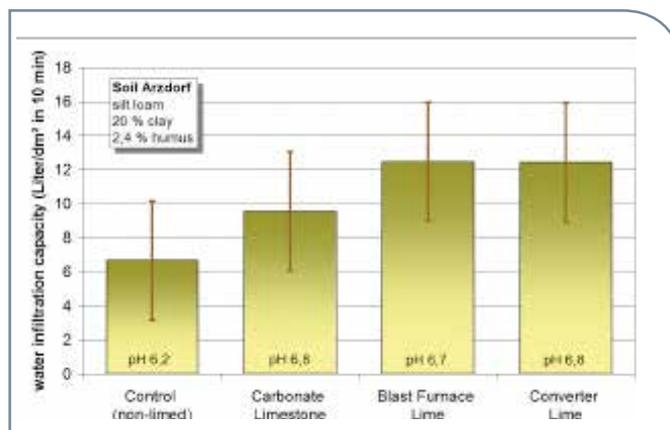
### Terminologie des illustrations

- **Carbonate limestone** : carbonate de calcium (calcaire broyé)
- **Blast furnace lime** : fines de laitiers cristallisé de haut fourneau
- **Converter lime** : fines de laitiers de convertisseur
- **Lime** : chaux
- **Thomas lime** : scorie Thomas

2 - <http://www.hk-kalke.de/>

## Amélioration de la rétention d'eau par le sol

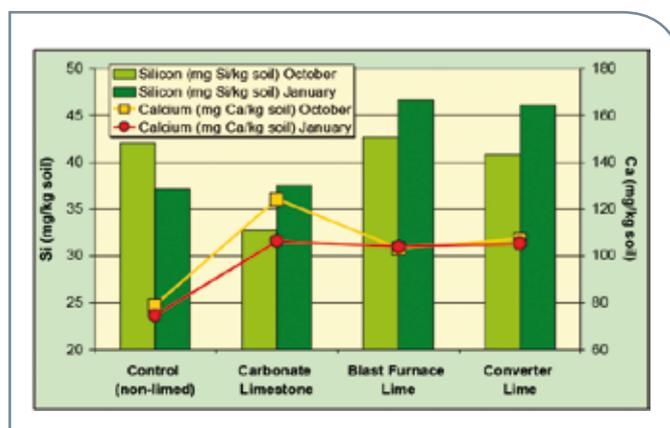
La figure suivante illustre l'amélioration de la capacité d'infiltration de l'eau du sol (valeurs moyennes observées sur trois ans) en fonction de la nature du chaulage d'un sol limoneux.



**Figure 3** Infiltration comparée de l'eau en fonction de la nature de l'amendement utilisé

Ces essais ont été réalisés en plein champs sur un terrain situé à Arzdorf en Allemagne. Ces données confirment que l'addition de laitiers de convertisseur permet mieux qu'un autre amendement d'améliorer la capacité du sol à retenir l'eau, et donc augmente l'efficacité agronomique.

## Apport de la teneur en silice des amendements sur la tenue des sols



**Figure 4** Impact comparé de différents matériaux de chaulage sur les sols

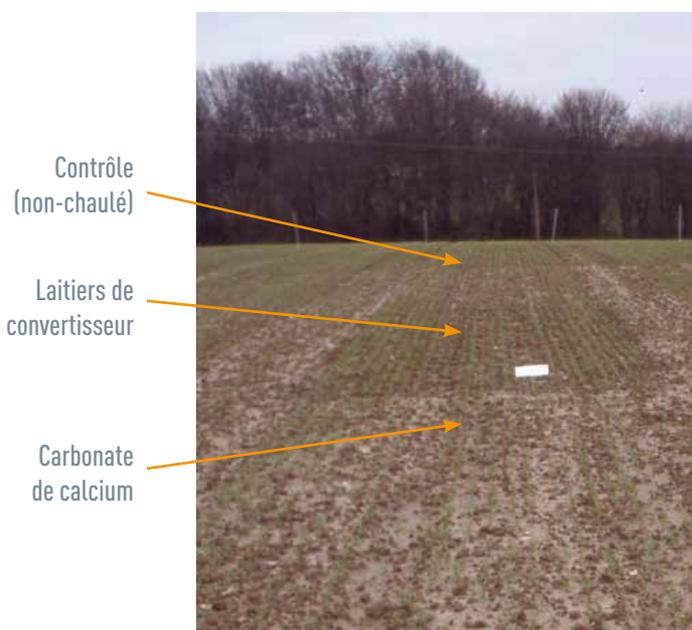
La figure ci-dessus illustre la comparaison de l'impact sur les sols de différents matériaux de chaulage contenant plus ou moins de silice, et appliqués sur des sols durant

## AMENDEMENT DES SOLS

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

15 années, (essais réalisés sur des terrains d'Arzdorf en Allemagne) avec un sol témoin sans amendement.

L'impact sur les sols est quantifié en fonction des teneurs en calcium et en silicium extractibles à l'eau et disponibles dans le sol. Les teneurs en silicium soluble, plus élevées dans le sol en janvier, conduisent à une meilleure stabilité des particules du sol et à une meilleure infiltration de l'eau.



**Figure 5**  
Exemple de terrains traités avec différents matériaux de chaulage



**Figure 6**  
Evaluation des effets des laitiers de convertisseur sur une parcelle de maïs

## Effet de l'addition d'amendement sidérurgique sur la mobilisation des phosphates

L'étude suivante illustre la mobilisation des phosphates dans différentes natures de sols (sableux, limoneux ou argileux), en fonction de la nature du chaulage effectuée sur ces différents sites (Figures 7 à 9).

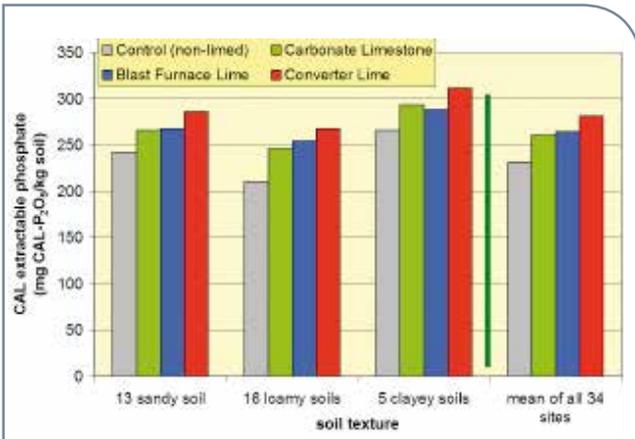


Figure 7

On peut constater que le chaulage permet d'augmenter les teneurs en phosphates disponibles (après extraction au calcium acetate lactate CAL) pour les plantes dans le sol, et ceci, quelle que soit la nature des sols considérés : sableux (sandy), limoneux (loamy) ou argileux (clayey). Ceci est encore plus significatif avec le chaulage réalisé à l'aide de laitiers de convertisseur. L'apport de silicium améliore la désorption des phosphates.

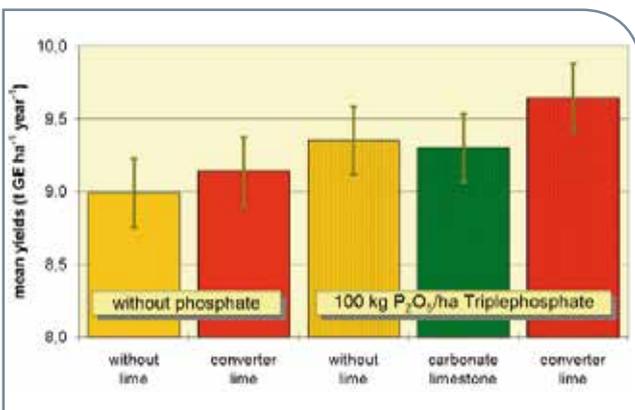


Figure 8

Cette figure illustre l'effet de la nature du chaulage (sans chaulage, avec laitiers de convertisseur, ou avec amendement calcaire) sur les rendements (« grain equivalent » GE) au travers d'essais en plein champ réalisés après plus de 6 années d'amendements réguliers.

Au cours de ces expériences de terrain réalisées à long terme, on a pu démontrer que c'est l'effet conjoint de la fertilisation en P (avec TSP)<sup>3</sup> en combinaison avec le silicium apporté par les laitiers de convertisseur qui a été le plus significatif sur les rendements.

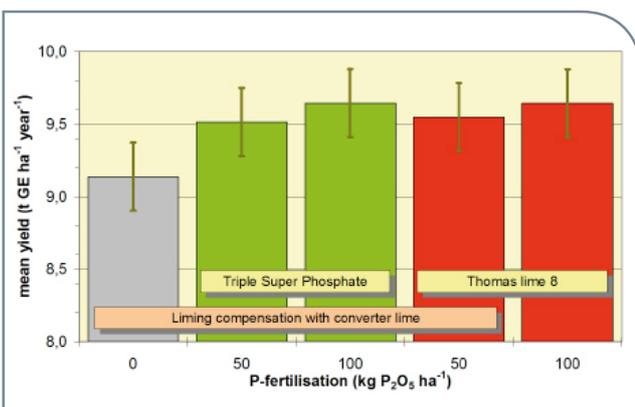


Figure 9

Cette figure démontre la mobilisation du phosphate contenu et fourni par les laitiers de convertisseur observée sur des essais sur champ pendant 6 années.

La combinaison du phosphate soluble à l'eau provenant du laitier de convertisseur a conduit aux mêmes rendements que le calcium silico phosphate fourni par la scorie Thomas.

## Effet de l'apport en amendement sidérurgique sur la disponibilité de la silice soluble

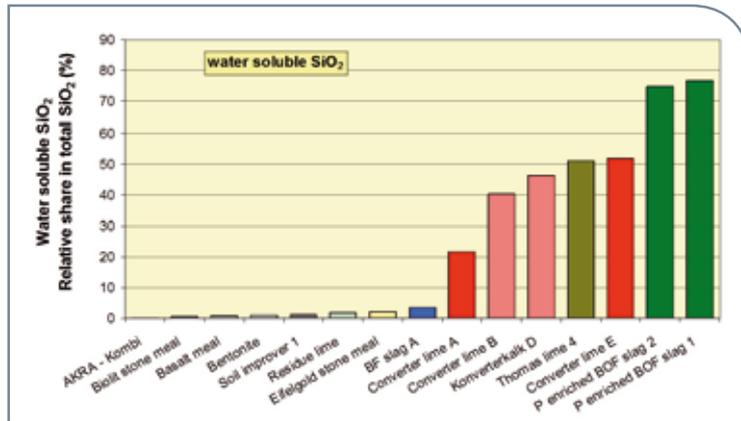


Figure 10

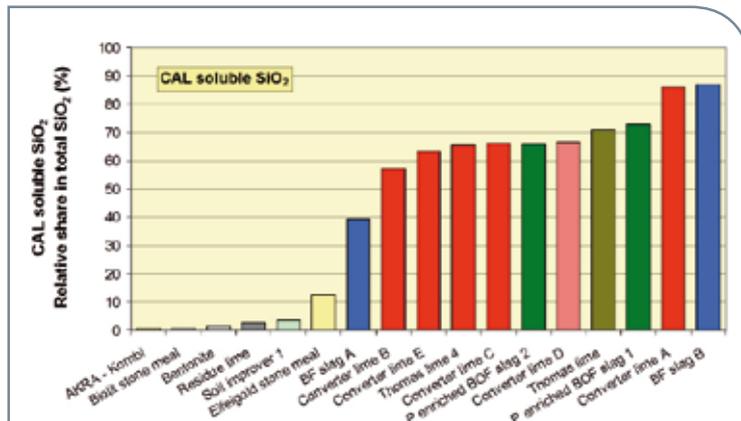


Figure 11

Ces essais démontrent que seul le silicium présent dans les liaisons minérales que l'on retrouve dans les laitiers de convertisseur ou les laitiers de haut-fourneau permettra une solubilité plus élevée que celui présent dans les liaisons minérales stables comme le quartz (SiO<sub>2</sub>) classiquement présent dans les nombreux amendements pour sols à base de fines de roche. En effet, c'est la minéralogie propre aux laitiers qui explique ce phénomène. La dissolution et la solubilité élevée des silicates de calcium (C<sub>2</sub>S) présents dans les laitiers conduisent à une meilleure

La figure 10 illustre parfaitement l'effet de la silice soluble disponible pour la plante par rapport à la quantité totale de silice contenue dans différents types de chaulages utilisés.

Cet essai est réalisé par une extraction à l'eau, conduisant à une extraction en milieu basique compte tenu du pH basique lié au laitier de convertisseur.

Un essai complémentaire (figure 11) a donc été réalisé après une extraction dans une solution d'acétate de calcium (CAL<sup>4</sup>). Cette méthode d'évaluation est actuellement celle appliquée aux sols en Allemagne.

L'objectif de cette méthode est de pouvoir décrire quelle quantité de silice est extractible dans ces conditions de pH (autour de 4,3) imposées par cette solution CAL.

Cette méthodologie est jugée bien plus représentative et est utilisée et reconnue par les représentants agricoles en Allemagne.

disponibilité des éléments importants (SiO<sub>2</sub>, Ca et P) pour l'amendement en agriculture. Ceci est d'autant plus vrai que le calcium est conjointement libéré par la dissolution de la chaux libre présente dans les laitiers de convertisseur.

Par conséquent, en augmentant la teneur en silicium présente en solution dans un sol, cela engendrera des effets positifs sur l'absorption de silicium par les plantes, ainsi que sur la stabilité des particules du sol, et à terme une amélioration de l'efficacité agronomique.

## Quels marchés s'ouvrent à l'utilisation des laitiers de convertisseur ?

L'estimation de la taille du marché maximal atteignable (en local ou à l'export) peut être calculée en utilisant des ratios classiquement utilisés par les agriculteurs, à savoir des quantités d'amendements fixées entre 1 à 2 tonnes de fines de laitier de convertisseur épandues à l'hectare et par an. Ainsi, ce ratio permettrait d'atteindre actuellement des tonnages compris entre 20 000 et 100 000 tonnes de matière par usine sidérurgique, en fonction du type de sols trouvés dans un périmètre pouvant atteindre en France jusqu'à 500 km autour d'un site sidérurgique.

La demande sur le marché et l'importance du marché seront dictées par plusieurs facteurs :

- Types de sols et acidité des sols, dont le pH devra être maintenu,
- Importance du tissu agricole de la zone géographique considérée, à savoir la part des zones cultivées et terres arables à proximité de l'usine sidérurgique considérée,
- Développement d'une filière de distribution et d'épandage spécifique aux laitiers de convertisseur.

### Types de sols et acidité des sols

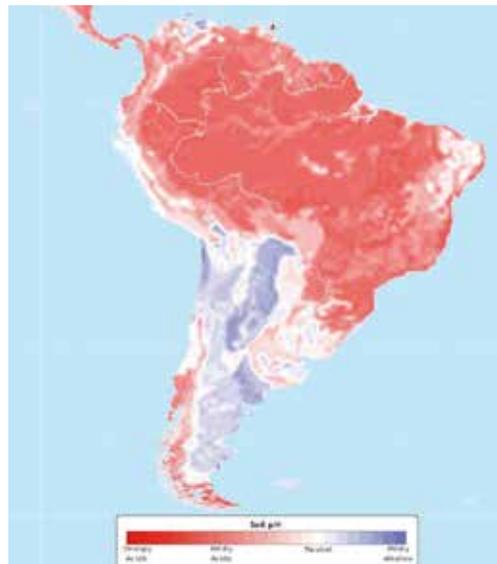
Les cartes d'identification des sols acides et des niveaux de pH des sols vont permettre de déterminer les zones, les régions, voire les pays pour lesquels ce marché s'avérera particulièrement pertinent, au contraire des zones qui ne nécessiteront qu'un traitement d'entretien du niveau de pH des sols.

**Figure 13**

Cartographie de l'acidité des sols européens et implantation des sites de production ArcelorMittal

A l'échelle mondiale, les sols les plus acides sont clairement identifiés et cartographiés. La carte ci-dessous illustre par exemple le pH des sols pour l'Amérique du Sud.

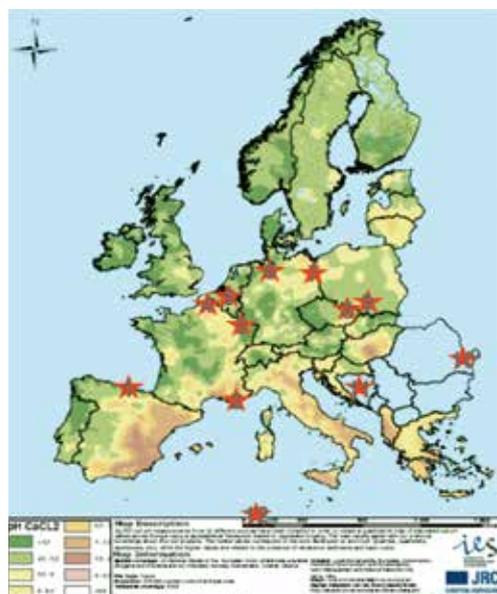
En superposant cette carte à celle des reliefs et des zones cultivées, on peut ainsi clairement identifier les zones de développement pour le marché d'utilisation des laitiers de convertisseur en agriculture.



**Figure 12**

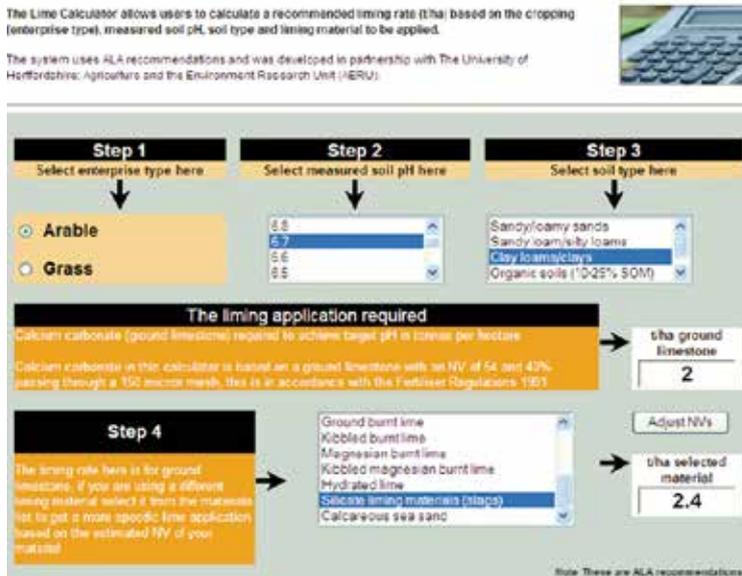
pH des sols : exemple de l'Amérique du Sud

La carte ci-dessous illustre également la même problématique à l'échelle de l'Europe. Toutes les zones en vert, ou vert foncé, montrent une acidité élevée des sols.



### Localisation des usines ArcelorMittal

1. Asturias
2. Fos sur Mer
3. Florange storage
4. Dunkerque
5. Liege storage & Gent plant
6. Bremen
7. Eisenhüttenstadt
8. Ostrava
9. Dabrowa & Krakow
10. Galati
11. Zenica
12. Annaba



**Figure 14**  
Exemple d'outil  
informatique  
(Grande Bretagne)  
à disposition  
des agriculteurs  
visant à évaluer  
les besoins en  
amendement  
des sols

Dans certains pays, des outils informatiques ont été développés et sont mis en ligne afin d'aider les agriculteurs à calculer les besoins en amendements pour les sols, en prenant en considération :

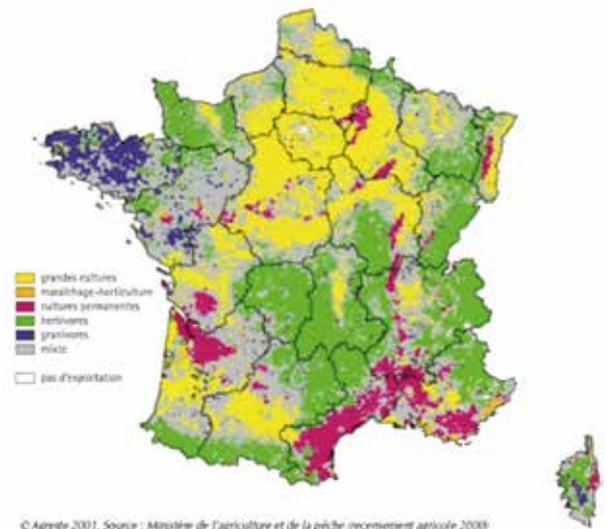
- le type de sols,
- le type de culture réalisée.

C'est le cas par exemple en Angleterre où sur le site internet des producteurs de chaux<sup>5</sup>, un logiciel de calcul des apports en amendements calciques est accessible. Celui-ci prend en considération l'utilisation possible de laitiers de convertisseur parmi différents types d'amendements calciques applicables sur les sols. De fait, une promotion permanente de l'utilisation des laitiers de convertisseur est assuré par ce type d'outils en ligne.

En quelques clics, les agriculteurs intéressés peuvent à tout moment estimer les tonnages de laitiers de convertisseur qu'ils peuvent épandre en fonction du type de champs sélectionné.

### Importance du tissu agricole de la zone géographique considérée

L'utilisation de laitiers sidérurgiques en amendements doit évidemment également être reliée à l'importance des activités agricoles dans les zones visées. La France, par exemple, est un pays dont l'activité agricole est très présente et très importante. La carte suivante illustre la nature des activités agricoles (culture, sylviculture, élevage, ...) à l'échelle du territoire national.



Par conséquent, l'utilisation potentielle de volumes de laitiers sidérurgiques est probablement importante dans un pays agricole aussi développé que la France, mais cela reste actuellement difficilement chiffrable.

### Développement d'une filière de distribution et d'épandage spécifique

Le développement d'une filière pérenne et durable de valorisation des laitiers de convertisseur en amendements agricoles passe enfin par la mise en place d'une filière de distribution et d'épandage spécifique, adaptée aux caractéristiques des laitiers.

<sup>5</sup> - Pour accéder à ce site internet, utilisez le lien suivant :  
[www.aglime.org.uk/index.php](http://www.aglime.org.uk/index.php)  
[www.aglime.org.uk/lime\\_calculator.php](http://www.aglime.org.uk/lime_calculator.php)

Sur le marché français, l'opération de broyage va générer un produit fin, qui pourra être chargé directement sur des camions silos pour livraison chez l'agriculteur. L'épandage des laitiers sidérurgiques nécessitera les mêmes moyens que pour l'épandage de tout autre amendement basique (chaux, calcaire, ...).

Des mélanges peuvent être préparés à base de laitiers de convertisseur enrichis avec par exemple des ajouts de phosphates (TSP). Dans ce cas, certaines entreprises (en France, en Allemagne) pratiquent la «granulation» qui produit des petites granules de 2 à 3 mm qui peuvent être distribuées avec des épandeurs à disques. Ces granules interagissent avec l'eau de pluie et l'humidité des sols pour se dissoudre lentement dans les sols.

## Conclusions

Tous ces éléments démontrent la valeur ajoutée de l'utilisation des laitiers de convertisseur comme amendements en agriculture. La qualité et les caractéristiques de ce produit sont indéniables et le marché agricole a besoin de ce type de matière.

Depuis un passé récent, le laitier de convertisseur était essentiellement vendu pour un usage lié à la teneur en chaux qu'il contient. Cependant, d'autres éléments comme le phosphore, largement biodisponible pour la plante, lui confère une valeur agronomique très intéressante. Leur disponibilité régionale et la régularité de leur production sont également des avantages certains. Cette utilisation est ainsi fortement appelée à se développer dans le futur compte tenu des besoins réels exprimés par les représentants de la profession agricole en France.

Certaines installations de granulation permettent également de préparer des mélanges intégrant des laitiers de convertisseur moulus ou criblés (fines dites naturelles) avec d'autres amendements ou fertilisants, générant ainsi des granules dont l'efficacité est démultipliée. De cette technique peut résulter toute une gamme de produits fertilisants préparés en fonction des besoins précis des agriculteurs (nature des sols, nature des cultures, etc ...).

Ainsi, divers développements sont actuellement soit en cours, soit envisagés pour cette application, sans présager des nouvelles opportunités qu'il reste encore à explorer. La promotion des atouts des laitiers de convertisseur en agriculture est un élément indispensable à la bonne image du produit et au développement de ces usages agricoles, bénéfiques tant pour les plantes que pour l'économie et respectueux de l'environnement.

# Les laitiers

## au secours de l'agriculture



Quel que soit le mode d'élaboration de l'acier dont ils sont issus, les laitiers sidérurgiques sont tous semblables dans leurs constituants principaux.

Sur le plan de leur composition chimique, ils présentent des similitudes avec la croûte terrestre qui est le médium permettant la filtration des eaux douces. Il est logique que les laitiers puissent être utilisés pour la filtration d'eau, le traitement des eaux usées, comme amendement pour la restructuration ou la modification des sols, ou encore comme fertilisants agricoles.

S'appuyant sur de nombreuses études réalisées notamment aux États-Unis, cet article fait le point sur les caractéristiques et les apports des laitiers quant à leurs usages agricoles.

De très belles perspectives de débouchés s'offrent ainsi aux laitiers qui contribueront très vraisemblablement dans le futur à résoudre les problèmes environnementaux et sociétaux actuels.

### Les laitiers et leurs différentes typologies

Le laitier d'aciérie est défini par l'ASTM (American Society for Testing and Materials) comme un «produit non métallique, composé essentiellement de silicates et de ferrites de calcium, combinés à un amalgame d'oxydes de fer (Fe), d'aluminium (Al), de manganèse (Mn), de calcium (Ca) et de magnésium (Mg). Ce co-produit est généré simultanément avec l'acier dans des convertisseurs à l'oxygène, des fours à arc électrique et des fours Thomas» (ASTM International, 2009).

Toutefois, les laitiers sont souvent désignés par d'autres termes : par exemple, déchets d'origine industrielle, sous-produits, co-produits, granulats secondaires, scories, ... Ces autres dénominations, et les significations associées, sont souvent utilisées pour déterminer le mode de gestion des laitiers, que ce soit à des fins de réutilisation - et dans ce cas pour quels usages - ou à des fins d'élimination dans des installations de stockage réglementées. La sémantique varie également selon le pays, la région, et leur utilisation est souvent davantage motivée par des pratiques historiques ou des considérations politiques, que fondée sur des faits scientifiques établis.

L'industrie sidérurgique, elle, utilise d'autres termes spécifiques pour différencier les laitiers, selon leur processus de production, la phase du processus, le type ou la nuance particulière d'acier élaboré, ou l'un de ses constituants majeurs.

Des exemples de noms se référant au processus ou à une phase de processus comprennent :

- four à arc électrique (LAFE),
- haut-fourneau (LHF),
- convertisseur à oxygène (LAC),
- four Thomas (Open Hearth Furnace),
- décarburation argon-oxygène (AOD),
- métallurgie de poche ou métallurgie secondaire (SMS).

Des exemples de désignations font référence au produit élaboré, voire à des nuances d'acier particulières :

- laitier de fonte,
- laitier d'acier carbone et laitier d'acier inoxydable,
- laitier d'alliages particuliers tels que des alliages au nickel,
- laitier d'alliages au titane, etc.

D'autres désignations font, elles, appel à la présence d'un constituant défini majeur :

- laitier phosphoreux,
- laitier hématite,

Avec plus de mille formulations différentes utilisées pour élaborer les aciers de spécialités et une production annuelle globale estimée à plus de 400 millions de tonnes de laitiers (Proctor, 2000), il est surprenant que tous les laitiers puissent être semblables dans leurs constituants principaux.

### Caractéristiques chimiques des laitiers

Les laitiers sidérurgiques sont essentiellement constitués par la chaux et la dolomie utilisées comme fondants lors du processus sidérurgique, ainsi que d'autres constituants minéraux (coke, résidus de minerai, etc.) utilisés lors de la production de la fonte et de l'acier, les rendant relativement similaires dans leur composition chimique (Proctor, 2000).

Toutefois, les laitiers de haut-fourneau sont composés majoritairement de silicium et d'alumine avec des oxydes de calcium et de magnésium (laitiers «réduits» de couleur claire), tandis que les laitiers d'aciérie de conversion et de four électrique présentent une concentration beaucoup plus élevée en oxydes de fer et de manganèse (laitiers «non-réduits» de couleur plus sombre).

La composition chimique et minéralogique exacte d'un laitier, intègre divers silicates de calcium (mono-, di- et tri-), avec ou sans magnésium, calcium et/ou ferrites de magnésium, aluminates de calcium (avec ou sans silicates), oxydes de fer et parfois des traces de chaux libre et de magnésie libre ainsi que du quartz. Leurs proportions relatives, et les caractéristiques physiques des laitiers (masse, taille de grain et propriétés structurales) varient selon le processus particulier du site sidérurgique concerné, le mode de refroidissement du laitier (à l'air ou à l'eau) et les éventuels traitements aval de démétallisation, et/ou criblage, et/ou broyage (US Dept. Of Transportation, 2012).

### Similarité des laitiers avec la croûte terrestre

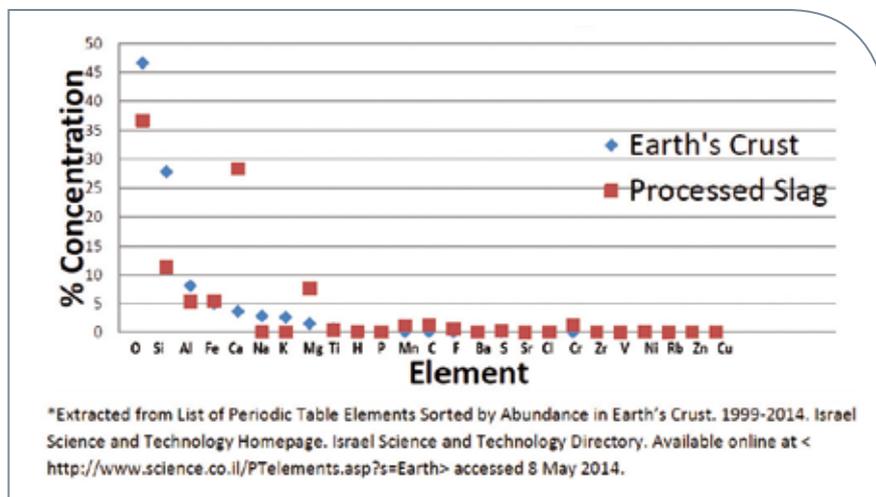
Ce qui est intéressant est le fait que ces mêmes composés inorganiques, constituant les laitiers, existent également à l'état naturel comme composants de la croûte terrestre, des roches et des minéraux naturels. Les laitiers ont été comparés à la croûte terrestre en ce qui concerne leur contenu minéral. «Au dessus du magma existe une fine couche de roches légères semblable à du laitier et appelée la croûte... et c'est la seule partie qu'un homme peut communément voir» (National Research Council, 1952). «Parce que la chaux et le silicium

sont naturellement présentes dans la croûte terrestre, la composition du laitier d'aciérie est semblable à celle des roches sédimentaires» (Cartmell, 2014). «La soi-disant «croûte»... a été comparée... à une couverture de laitier sur la partie intérieure» (Clarke, 1924).

La figure 1, ci-dessous, montre la comparaison des teneurs élémentaires des 25 premiers éléments présents dans la croûte terrestre avec celles obtenues par analyse par fluorescence X des 25 premiers éléments d'un laitier de four électrique obtenu lors de l'élaboration d'un acier inoxydable après les opérations industrielles classiques post-génération (démetallisation, criblage et broyage).

De ces 25 éléments, le strontium (Sr), le vanadium (V) et le rubidium (Rb) ne sont pas détectables dans le laitier. Les 53 autres éléments (sur un total de 78) trouvés dans la croûte terrestre présentent des concentrations <0,006% et ne sont pas détectables. Les autres éléments sont listés de gauche à droite dans l'ordre de concentration décroissante dans la croûte terrestre : oxygène (O), silicium (Si), aluminium (Al), fer (Fe), calcium (Ca), sodium (Na), potassium (K), magnésium (Mg), titane (Ti), hydrogène (H), phosphore (P), manganèse (Mn), carbone (C), fluor (F), baryum (Ba), soufre (S), strontium (Sr), chlore (Cl), chrome (Cr), zirconium (Zr), vanadium (V), nickel (Ni), rubidium (Rb), zinc (Zn) et cuivre (Cu).

**Figure 1**  
 Comparaison des teneurs élémentaires des 25 premiers éléments présents dans la croûte terrestre avec ceux d'un laitier d'aciérie électrique ou filiaire inox\*



La croûte terrestre supporte toute la vie connue dans l'univers, est épaisse d'à peu près 40 km et est le médium qui assure la filtration des eaux douces (National Geographic Society, 1993). En conséquence, ce n'est pas surprenant que les laitiers soient utilisés pour remplir certaines de ces mêmes fonctions essentielles au maintien de la vie telles que la filtration d'eau, le traitement des eaux usées et des eaux acides d'exhaure de mines, comme amendements à la fois dans le cadre de la restructuration et de la modification des sols et comme fertilisants fournissant les nutriments minéraux nécessaires aux plantes (dont Ca et Mg) et inévitablement aux aliments humains et animaux.

## Caractéristiques et usages des laitiers

La composition chimique des laitiers d'aciérie de conversion (LAC) en oxydes simples, déterminée après analyse en fluorescence X, est indiquée dans le Tableau 1 ci-dessous. Ces fourchettes peuvent varier mais sont considérées comme représentatives des valeurs trouvées dans la plupart des laitiers d'aciérie (US Dept. Of Transportation, 2012).

Considérant les similarités existant entre les laitiers et la croûte terrestre (Figure 1), ainsi que les concentrations respectives en calcium, magnésium et oxyde de silicium (Tableau 1), il est donc naturel que les laitiers soient utilisés dans diverses applications telles que la fabrication du béton et du ciment, du verre ou de la laine de roche, dans les couches de base de chaussées, en revêtements de chaussées ou en remblais, pour la stabilisation des sols, comme ballasts ferroviaires, ou comme fondants métallurgiques<sup>1</sup>.

## Autres caractéristiques des laitiers et usages en amendements basiques agricoles

L'utilisation de laitiers comme amendements basiques n'est pas nouvelle : aux Etats-Unis, il est signalé dès les années 1925 (Barber, 1984). Les laitiers d'aciérie sont alcalins par nature et offrent des niveaux de pH allant de 8,0 à 12,5, ce qui, en association avec des teneurs élevées en calcium et magnésium, et leur similarité avec les matériaux constituant la croûte terrestre, en font une excellente alternative aux amendements basiques agricoles (US DOT, 2012 ; Heckman, Johnston & Cowgill, 2003).

CONSTITUANTS SOUS FORME D'OXYDES	COMPOSITION (%)
Calcium (CaO)	22,8 - 55,1
Silicium (SiO <sub>2</sub> )	10 - 35
Fer(Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	0,3 - 40 (70 - 80% FeO, 20 - 30% Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )
Manganèse (MnO)	0 - 8
Magnésium (MgO)	4,8 - 12
Aluminium (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	1 - 16,5
Phosphore (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	0 - 1,7
Soufre (SO <sub>3</sub> )	0-0,8

**Tableau 1**

Composition chimique typique des laitiers d'aciérie de conversion (en % d'oxydes calculés)

(1) Données issues des divers organismes professionnels globaux s'occupant des laitiers : Australasian Slag Association (ASA), National Slag Association (NSA), European Slag Association représentant les transformateurs et producteurs de laitiers sidérurgiques (EuroSlag) ainsi que la Nippon Slag Association of Japan.

Les laitiers sont souvent épandus à des taux similaires à ceux des autres amendements basiques sur la base de leur teneur en carbonate de calcium équivalent (CCE), leur valeur de neutralisation effective (ENV), leur pouvoir de neutralisation effectif (ENP), leur pouvoir total de neutralisation (TNP) ou tout autre critère d'évaluation de l'efficacité d'un amendement calcique.

Les tests pour mesurer la valeur de neutralisation d'un sol acide par un amendement incluent à la fois une mesure des teneurs en Ca et en Mg, ainsi que l'analyse granulométrique fondée sur un tamisage du matériau employé (Tableau 2). Une faible granulométrie présente davantage de surfaces de réaction, ce qui rend la dissolution plus rapide lorsque le laitier est épandu sur le sol.

résulte implique également l'existence potentielle de poussières, ayant pour conséquence, non seulement de poser des problèmes quant aux émissions lors de l'épandage, mais également quant à la bonne maîtrise de l'épandage de l'amendement sur le terrain.

Les fermiers préfèrent souvent l'utilisation des laitiers aux autres matériaux d'amendement. En effet, en utilisant de la chaux calcique, les niveaux de magnésium dans le sol peuvent être trop faibles ; dans le cas de l'utilisation de chaux dolomitique, cela peut conduire à des niveaux de calcium trop faibles (cf. exemple de l'Annexe 1).

Considérant que la chaux est appliquée pour maintenir le pH du sol dans la fourchette de 6 à 7 recommandée pour une croissance optimale de la flore, et que

**Tableau 2**  
Analyse de la teneur en chaux

<b>LIME ANALYSIS</b>					
				DATE RECEIVED: 8/12/2013	
				DATE REPORTED: 8/14/2013	PAGE: 1 of 2
PARAMETER	AS RECEIVED BASIS	DRY BASIS	UNIT	REPORTING LIMIT (AR BASIS)	METHOD REFERENCE
Moisture (105 deg. C)	0.5	0.0	%	0.1	AOAC 950.01
Solids	99.5	100.0	%	0.1	AOAC 950.01
Calcium (Ca)	32.4	32.6	%	0.1	ASTM C602.20
Calcium (Ca)	649	652	lb/T	0.1	ASTM C602.20
Magnesium (Mg)	5.6	5.6	%	0.1	ASTM C602.18-20
Magnesium (Mg)	111	112	lb/T	0.1	ASTM C602.18-20
Calcium Carbonate Equiv. (CCE)	104.4	104.9	%	0.1	AOAC 955.01
Passing U.S. #8 Sieve		100.0	%	0.1	AOAC 924.02
Passing U.S. #20 Sieve		100.0	%	0.1	AOAC 924.02
Passing U.S. #60 Sieve		88.7	%	0.1	AOAC 924.02
Passing U.S. #100 Sieve		74.4	%	0.1	AOAC 924.02

Sample was wet sieved.  
CCE was titrated 24 hours after acid digestion.

PARAMETER	AS RECEIVED BASIS	DRY BASIS	UNIT	REPORTING LIMIT (AR BASIS)	METHOD REFERENCE
<b>Ohio Lime Quality Parameters:</b>					
Total Neutralizing Power (TNP)	104.4	104.9	%	0.1	Ohio Dept Ag 905.51
Fineness Index		95.5	%	0.1	Ohio Dept Ag 905.51
Effective Neutralizing Power (ENP)	1993	2003	lb/T	1	Ohio Dept Ag 905.55
Grade	Pulverized Liming Material				Ohio Dept Ag 905.54
Adjusted Lime Application Rate = Recommended Rate of Standard Lime x (2000 / ENP)					OSU Bulletin 422

Dans le but de pouvoir enregistrer un produit comme amendement basique, les règlements gouvernementaux américains requièrent en particulier que celui-ci soit conforme à des exigences dimensionnelles (Cf. Annexe 1); (Turner, 2014). Par conséquent, pour se conformer à ces exigences granulométriques, il est souvent nécessaire de procéder à un tamisage, un broyage, ou encore parfois une mouture des laitiers. Toutefois, la faible taille des grains qui en

l'emploi d'amendement est recommandé seulement tous les 2 à 4 ans pour les sols acides (Lathwell, 1984 ; Mullen, 2008), les fermiers doivent donc attendre cette même période pour corriger d'éventuelles déficiences en magnésium ou en calcium dues à l'épandage de chaux calcique ou dolomitique. Ceci ne se produit pas en cas d'utilisation de laitiers car ils contiennent des niveaux suffisants à la fois en calcium et en magnésium (Tableau 2). Ainsi, les

laitiers sidérurgiques, qui contiennent des proportions adaptées de calcium et de magnésium, sont souvent préférés aux autres amendements.

Lorsque les laitiers sont utilisés comme amendements, il est recommandé d'observer un taux d'humidité optimal de 15 à 18 % (plus largement, un taux de 10 à 20% est également acceptable), afin d'en faciliter la manutention et l'écoulement dans l'équipement d'épandage, d'en uniformiser l'épandage et de minimiser l'envol de poussières. Toutefois, l'inconvénient principal découlant de ce taux d'humidité est l'augmentation de masse qui entraîne des coûts plus élevés de transport depuis le site de production, ce qui peut en limiter le rayon de chalandise.

## Intérêt des silicates contenus dans les laitiers sidérurgiques pour leur utilisation en amendements

Bien que les laitiers se comportent de façon similaire aux autres matériaux d'amendement agricole en libérant progressivement du Ca et du Mg, et en neutralisant l'acidité des sols, les phases minérales existantes dans les laitiers et incorporant le Ca et Mg sont généralement des dérivés des différentes formes de silicates de calcium et de magnésium, plutôt que de carbonates. L'unité de base des silicates ( $\text{SiO}_2$ ) est

formée d'un atome de silicium (Si) entouré par quatre atomes d'oxygène formant un tétraèdre de silicium (Encyclopedia Britannica Online, 2014).

Les silicates sont les minéraux présents sous les formes les plus variées sur la planète ( $\approx 600$  types différents recensés), souvent référencés comme minéraux «formant les roches» (Warburton, 2011; Encyclopedia Britannica Online, 2014), comme par exemple : feldspaths, amphiboles, pyroxènes, micas, olivines, feldspathoïdes ou encore zéolites. Les silicates sont les constituants majeurs de nombreuses roches ignées et sont présents en quantités substantielles aussi bien dans les roches sédimentaires que métamorphiques. Il n'est donc pas surprenant que l'élément silicium (Si) soit omniprésent dans la nature (Figure 1), constituant environ 25,7% de la croûte terrestre (Currie, 2007).

Une des différences principales entre les silicates «naturels» tels que contenus dans des roches et ceux présents dans les laitiers sidérurgiques réside dans une sorte de «vieillesse» lié aux étapes pré- et post-procédé de fabrication de l'acier. Ainsi, lorsque les laitiers sont épandus sur les sols, les silicates se décomposent rapidement en libérant à la fois du calcium et du magnésium, alors que l'anion silicate  $[\text{SiO}_4^{4-}]$  réagit pour former de l'acide monosilicique  $[\text{Si}(\text{OH})_4]$ . L'acide monosilicique, plus communément appelé acide silicique ou «silicium soluble», est une molécule non chargée, soluble, et qui est la forme sous laquelle le silicium est assimilé par la plante (Richmond, 2003 ; Epstein, 1999 ; Richmond, 2003 ; AAPFCO, 2013).

Année	Amendement	Si dans la	Si dans	Si du	pH du	Rendement
		feuille étandard	la paille	sol		sol
		%		ppm		
2006	Calcaire	0,80	0,81	18,6	6,1	5,98
	Laitiers traités	1,03	1,18	45,2	6	6,10
	P>F 0.05	0,0008	<0,0001	0,0001	0,4825	0,1998
2007	Calcaire	1,14	0,25	27,2	6,5	5,02
	Laitiers traités	1,53	0,52	62,1	6,4	4,60
	P>F 0.05	0,0001	<0,0001	<,0001	0,0091	0,1087
2008	Calcaire	0,58	0,15	32,7	6,8	4,02
	Laitiers traités	1,18	0,52	93,5	6,8	4,47
	P>F 0.05	0,0002	<0,0001	<,0001	0,7697	0,0052

**Tableau 3**

Comparaison entre les quantités de Si captées par du blé d'hiver, les teneurs en Si et les pH des sols, et les rendements entre amendements à base de laitiers d'aciérie de four en filière inoxydable et amendements calcaires sur une période de 3 années consécutives

Une étude (Provance-Bowley, Heckman & Durner, 2010) comparant l’amendement de sols par des laitiers d’aciérie de four électrique en filière inoxydable (cf. annexe 2) - composés de silicates de calcium et de magnésium -, avec d’autres amendements à base de chaux calcaïques et dolomitiques, a confirmé le bénéfice supplémentaire apporté par le silicium soluble présent dans les laitiers, améliorant les rendements des cultures et réduisant la sévérité des maladies du fait de l’accroissement du captage de silicium par la plante (Tableau 3).

### Un marché pour les fertilisants à base de silicium

On trouve les premières traces de silicium utilisé en tant que fertilisant en 1840 (Leibig, 1840), alors que le premier brevet concernant un engrais à base de silicium a été enregistré aux Etats-Unis en 1881 (Zipicotte, 1881). Cela correspond à peu près à l’époque à laquelle Bessemer a breveté le procédé qui porte son nom en 1855, procédé qui révolutionna la fabrication de l’acier et qui permit de le produire en grandes quantités (Wikipedia, 2014). Par ailleurs, Onodera démontra,

il y a presque un siècle, la corrélation entre l’accroissement de la teneur en silicium dans les plantes et une réduction de la maladie fongique pyriculariose (Magnaporthe prisea M.E. Barr) du riz asiatique (*Oryza sativa* L.) ; (Onodera, 1917).

En dépit de ces premières références, il faut attendre la dernière partie du 20<sup>ème</sup> siècle pour que les bénéfices du silicium sur la production des cultures attirent l’attention de la communauté scientifique. En 1999, la Première Conférence Internationale sur le silicium dans l’Agriculture s’est tenue à Fort Lauderdale (Floride, USA)<sup>2</sup>. Depuis lors, des conférences ont lieu tous les 3 ans, dont la dernière s’est tenue du 26 au 30 août 2014 à l’Université de Stockholm (Suède)<sup>3</sup>.

Les bénéfices apportés par le silicium aux systèmes de cultures incluent la réduction de la toxicité des métaux (par ex. As, Cd, Fe, Mn, Zn), l’amélioration du captage des nutriments (Ca, K, P), la réduction des excès d’absorption des nutriments (N, P), et l’augmentation de la résistance au sel, à la sécheresse, aux rayons ultraviolets, aux basses et hautes températures, aux vents et aux pluies forts, aux maladies et aux insectes (Guntzer, 2012).

Bien que la concentration en silicium dans les plantes puisse varier de façon significative selon les espèces, allant de 0,1 à 10 % de la masse sèche totale de la plante

**Tableau 3**  
 Comparaison entre les quantités de Si captées par du blé d’hiver, les teneurs en Si et les pH des sols, et les rendements entre amendements à base de laitiers d’aciérie de four en filière inoxydable et amendements calcaires sur une période de 3 années consécutives

CULTURE	PRODUCTION (MT)	NOM SCIENTIFIQUE	CONCENTRATION EN SI DANS LES POUSSÉS (EN % MASSE SÈCHE)
Canne à sucre	1736	Saccharum officinarum	1,51
Maïs	826	Zea mays	0,83
Riz	686	Oryza sativa	4,17
Blé	683	Triticum aestivum	2,46
Pommes de terre	326	Solanaceae	0,40
Manioc	232	Manihot esculenta	0,50
Soja	231	Glycine max	1,40
Betteraves sucrières	222	Malpighiales	2,34-7
Orge	155	Hordeum vulgare	1,82
Tomates	136	Lycopersicon esculentum	1,55

\*Adapté de Guntzer et al., 2012

(2) <http://store.elsevier.com/Silico-in-Agriculture/isbn-9780444502629/>  
 (3) <http://www.silicon2014.com>.

(Epstein, 1999 ; Hodson, 2005), on estime que c'est entre 210 et 244 millions de tonnes de silicium qui sont prélevées annuellement de nos sols par les seules cultures (Matichenkov, 2001) !

Selon une étude récente (Guntzer, 2012), sur les dix cultures les plus importantes, classées sur la base du niveau global de production des récoltes publié en 2008 par l'Organisation Alimentaire et Agricole des Nations Unies (FAO), sept pourraient être considérées comme des «accumulateurs» de silicium, en concentrant plus de 1% de leur masse sèche en silicium (Tableau 4).

Ceci suggère que les plantes céréalières n'accumulent pas de hauts niveaux de silicium. Toutefois, ces niveaux peuvent varier selon l'organe considéré de la plante (par ex. feuille, racine, tige), selon son âge (mature / jeune) et selon la variété de céréale cultivée. Ainsi, les feuilles de maïs mature contiennent 5,09% de silicium alors que les grains ont une teneur en silicium beaucoup plus basse (Lanning, 1980). Par conséquent, et en dépit du fait que la quantité de silicium récupérée serait vraisemblablement faible dans les grains, pour un rendement estimé de 9,66 t/ha de maïs décortiqué, la biomasse supplémentaire produite et extraite du champ chaque année durant la récolte serait de l'ordre de 181,44 kg/ha.

Ainsi, considérant les preuves scientifiques des effets bénéfiques du silicium sur les plantes, la quantité importante de silicium captée par nos cultures les plus importantes et l'extraction constante du silicium des sols, les laitiers, de par leurs teneurs élevées en silicates, ont le potentiel d'être utilisés, non seulement comme des amendements, mais aussi comme des fertilisants riches en silicium.

## **Appellation d'engrais riche en silicium : «une substance bénéfique aux plantes»**

Fertilisants, amendements de sol et matériaux calciques sont strictement réglementés par les administrations concernées, que ce soit de façon internationale ou régionale. Ces organisations précisent la terminologie employée, les définitions et les mentions figurant sur l'étiquetage, quelles méthodes de test pour évaluer les constituants d'un engrais, quelles variabilités et tolérances acceptables, et si oui ou non, un élément chimique peut être considéré comme un nutriment de plante (et sous quelle forme).

Aux Etats-Unis, l'organisation responsable est l'Association of American Plant Food Officials (AAPFCO). En Europe, c'est le Comité Européen de Normalisation (CEN), et au niveau mondial, c'est l'Organisation Internationale de Normalisation (ISO) par son Comité Technique 134 «Engrais et amendements de sols» (ISO/TC134) qui traite de ces aspects. Ces organisations protègent et informent les consommateurs, le marché des fertilisants et les producteurs.

Elles définissent par exemple quelles formes de silicium (Si) sont acceptables et si elles peuvent être utilisées (ou non) pour leur capacité à fournir cet élément. En effet, toutes les formes de silicium présentes dans les sols (Richmond, 2003) ou dans les fertilisants (Snyder, 2001) ne sont pas assimilables par les plantes ; par exemple, le quartz est hautement insoluble. Par conséquent, on peut difficilement imaginer qu'un producteur de sable siliceux (quartz, silice,  $\text{SiO}_2$ ) puisse vendre un sac sous l'appellation d'engrais ou de fertilisant !

Afin de répondre à cette problématique, il a été nécessaire de développer et de valider une méthode de détermination du silicium soluble, ainsi que d'obtenir la reconnaissance du silicium comme nutriment (ou dans une autre catégorie comme celle des oligo-éléments) pour être utilisée dans les matières fertilisantes pour les plantes.

Les lignes directrices suivies par l'AAPFCO et les autres organisations de normalisation pour déterminer si un élément est ou non un nutriment « essentiel » pour les plantes sont fondées sur les exigences suivantes (Arnon, 1939) :

1. «Une déficience de cet élément rend impossible à la plante d'achever le stade végétatif ou reproductif de son cycle de vie»,
2. «Une telle déficience est spécifique à l'élément en question, et peut être évitée ou corrigée uniquement par la fourniture de cet élément ; et»,
3. «L'élément est directement impliqué dans l'alimentation de la plante, de façon séparée de ces effets de correction de conditions microbiologiques ou chimiques défavorables du sol ou de tout autre médium de culture ».

A ce jour, et en dépit des efforts des scientifiques, le statut du silicium comme «élément essentiel» (fondé sur les critères ci-dessus) a seulement été reconnu dans le cas de quelques espèces de plantes : prêles (Chen, 1969), betteraves (Raleigh, 1939), et les diatomées marines similaires aux plantes (Paasche, 1973), avec une «nécessité agronomique» reconnue pour le riz (Ma, 2005) et la canne à sucre (Fox, 1978). Toutefois, la nécessité du silicium reste un sujet de discussion du fait que la déficience en silicium freine la croissance, alors que l'addition de silicium l'améliore et protège les plantes d'attaques pathogènes, en particulier pour

le riz, l'avoine, l'orge, le maïs, le concombre, le tabac et les tomates (Jugdohsingh, 2007). Par ailleurs, le silicium est essentiel, à des degrés et dans des conditions environnementales variables, à de nombreuses plantes (Epstein, 1999).

La catégorisation des éléments (macro-éléments ou éléments-traces/oligo-éléments) qui doit être faite pour reconnaître qu'ils constituent des nutriments essentiels pour la plante contribue également à la confusion de la nécessité du silicium. Cette catégorisation est fondée sur la quantité de nutriment assimilée par les plantes. Pour certaines, les niveaux de silicium dépassent ceux des macronutriments, alors que pour d'autres, l'assimilation correspond à celle d'oligo-éléments.

Une autre question importante liée à la détermination de la nécessité du silicium réside dans son omniprésence dans la nature : dans l'air, l'eau, les ustensiles de laboratoire (flacons et tubes en verre) ou encore dans d'autres compléments de sels nutritifs d'addition. Ainsi, les tentatives d'exclure totalement le silicium du milieu de croissance de la plante en vue de prouver qu'il est indispensable se sont révélées extrêmement difficiles à réaliser (Takahashi, 1990). La liste actualisée des éléments nutritifs reconnus pour les plantes et autres substances bénéfiques figure dans le tableau périodique ci-dessous (Tableau 5).

H	Essential and Beneficial Elements in Higher Plants																He
Li	Be	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Essential Mineral Element</li> <li>■ Beneficial Mineral Element</li> <li>■ Essential Nonmineral Element</li> </ul>										B	C	N	O	F	Ne
Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
Cs	Ba	Lu	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
Fr	Ra	Lr	Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt									
		La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb		
		Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No		

Tableau 5

Tableau périodique identifiant les éléments chimiques reconnus actuellement comme essentiels et bénéfiques aux plantes

Extrait de « Eléments essentiels à la croissance des plantes : liste des éléments essentiels » (P. Barak, Ph.D. Professor, Dept of Soil Science, Univ. Of Wisconsin- Madison, March 1998) (<<http://soils.wisc.edu/facstaff/barak/soilscience326/listofel.htm>>) – Autorisation donnée le 27 juin 2014.

En 2012, l'AAPFCO a reconnu le silicium comme «substance bénéfique aux plantes» (AAPFCO, 2013), celle-ci étant définie comme «n'importe quelle substance ou composé autre que les nutriments primaires, secondaires ou oligo-éléments, et dont l'aspect bénéfique pour une ou plusieurs espèces de plantes a pu être démontré par des travaux scientifiques lors d'applications exogènes».

Cela a été suivi par la publication d'une méthode de détermination de la teneur en silicium soluble dans les engrais solides (Sébastien, 2013). Cette reconnaissance signifie que les fabricants d'engrais aux Etats-Unis peuvent dorénavant enregistrer les produits à base de Si comme fertilisants, en déclarant le pourcentage de Si soluble sur l'étiquette de leurs engrais et dans leurs brochures commerciales. De leurs côtés, les autorités gouvernementales disposent dorénavant d'une méthode pour régler les produits fertilisants à base de silice, et les acheteurs agricoles peuvent évaluer ces mêmes engrais sur la base d'une norme commune.

## L'usage des laitiers en amendements et engrais : aspects environnementaux et sanitaires

Les laitiers peuvent présenter des différences de concentrations en éléments-traces métalliques ou minéraux du fait des minerais employés, des nuances d'acier élaborées, et de l'étape de production d'acier pendant laquelle le laitier est généré (USDOT, 2012).

Les facteurs pouvant tout particulièrement affecter les concentrations en métaux dans les laitiers portent sur l'utilisation de séparateurs magnétiques sur les tapis des installations de concassage/criblage, et/ou l'emploi d'aimants montés sur grues en addition aux procédés de démétallisation ultérieurs. Les températures de coulée ainsi que les vitesses de refroidissement peuvent éga-

lement affecter les propriétés physiques et chimiques des laitiers et en conséquence la solubilité potentielle des métaux contenus.

Aux Etats-Unis, afin de prendre en considération cet aspect, ce sont les Règles relatives aux Biosolides, édictées par l'Agence Fédérale de la Protection Environnementale (US EPA – 40CFR503 Biosolids Rules)<sup>4</sup> qui ont été utilisées pour réglementer les laitiers et encadrer leurs teneurs en métaux lourds depuis le milieu des années 1990. Ces limites ont été fondées sur l'évaluation des risques liés aux teneurs en métaux dans les biosolides. Ces règles ne prennent évidemment pas en compte la différence entre la nature des laitiers et celle des biosolides organiques, en particulier les propriétés spécifiques des laitiers qui intègrent durablement les métaux dans leur matrice, les rendant ainsi moins susceptibles d'être libérés dans l'environnement, et par conséquent assimilés par les plantes.

Les métaux listés comme préoccupants, qui sont également référencés comme «polluants» par l'Agence Fédérale de Protection de l'Environnement américaine (US EPA) incluent l'As, le Pb, le Hg et le Se, aux côtés des oligo-éléments tels que le Cu, le Mo, le Ni et le Zn. Différentes limites ont été établies pour les différents usages des laitiers, les limites en métaux pour les emplois sur des terres agricoles étant plus strictes et donc plus basses que pour les autres usages. L'US EPA a déterminé quelles méthodes de mesures doivent être utilisées, et a également imposé que les teneurs en métaux (contenu total) ainsi que les fractions lixiviables soient évaluées.

Les engrais qui, historiquement, n'étaient pas considérés comme élaborés à partir de ressources secondaires, n'avaient pas jusqu'à un passé récent de limites imposées sur leurs teneurs en métaux. Mais, suite aux études de risques qui ont été menées, la déclaration de politique et d'interprétation uniforme de l'AAPFCO (Statement of Uniform Interpretation and Policy, SUIP 25), a conduit à l'adoption du «Règlement relatif aux Métaux Lourds». Les limites ainsi fixées par

(4) [http://www.ecfr.gov/cgi-bin/text-idx?c=ecfr&tpl=/ecfrbrowse/Titles40/40cfr503\\_main\\_02.tpl](http://www.ecfr.gov/cgi-bin/text-idx?c=ecfr&tpl=/ecfrbrowse/Titles40/40cfr503_main_02.tpl)

l'AAPFCO sont essentiellement fondées sur la teneur en phosphates, mais présentent également différentes limites concernant les oligo-éléments. Ces règles et limites peuvent être consultées sur le site internet de l'AAPFCO<sup>5</sup> qui comprend également un lien vers un tableur interactif permettant de réaliser des calculs.

Ce qui paraît préoccupant dans ce règlement, c'est que la teneur en silicium soluble n'est pas prise en compte dans le calcul des limites, puisqu'il est considéré comme une substance bénéfique plutôt que comme un oligo-élément. D'autre part, les éléments Ca et Mg ne sont pas non plus considérés comme des macro-nutriments lors de ces calculs. Les Biosolides et les composts ne sont pas couverts par ce règlement sur les engrais, mais sont renvoyés au règlement de l'US EPA 40 CFR 503.

Cela semblerait indiquer que :

- soit les laitiers doivent tomber sous l'application du Règlement pour les Biosolides, étant élaborés à partir de ressources secondaires, lorsqu'ils sont utilisés comme engrais,
- soit ils doivent également garantir la présence d'autres oligo-éléments (par exemple Fe, Mn ou Mo), ce qui rendrait les contrôles qualité extrêmement difficiles à réaliser sur les sites de production pour la composition chimique des laitiers destinés à être employés comme engrais.

*\* Se reporter également aux articles parus sur ce sujet dans de précédents numéros de Laitiers Sidérurgiques :*

- «Les techniques de déphosphoration»  
LS n° 86-87 (juin 2005)
- «Du laitier pour les produits laitiers»  
LS n° 89-90 (décembre 2006)
- «De l'efficacité des laitiers pour purifier l'eau»  
LS n° 91 (juillet 2007)
- «Des laitiers qui purifient l'eau,  
cela coule de source» - LS n° 95 (mars 2010)

(5) <http://www.aapfco.org/rules.html>,

## Utilisation des laitiers comme amendements : des propriétés complémentaires pour un développement durable !

Outre les conséquences spécifiques que présentent les laitiers dans le cadre d'une utilisation en agriculture, sur la réduction du stress et l'augmentation des rendements, les laitiers contribuent également à résoudre quelques uns des problèmes globaux majeurs pour l'environnement et en particulier, la production de gaz à effet de serre (voir les exemples cités en Annexe 3).

Par ailleurs, ils peuvent également contribuer à régler le problème de la présence des phosphates dans les milieux aquatiques. En effet, la libération des phosphates dans les eaux a eu, aux Etats-Unis, des conséquences néfastes sur le marché des engrais phosphatés. Suite à l'érosion des sols et au lessivage des phosphates dans les cours d'eaux et les systèmes d'écoulement des eaux, la présence de quantités élevées de phosphates a conduit à la croissance excessive d'algues et de plantes qui, en réduisant la clarté de l'eau ainsi que son niveau en oxygène, aboutit à la disparition de la faune aquatique (Miller, 2012).

En conséquence, aux USA, il y a actuellement au moins 11 Etats qui ont banni l'utilisation ou la vente d'engrais phosphatés.

Une fois encore, l'épandage de laitiers riches en silicates est une solution alternative potentielle au lessivage des phosphates. La fixation des phosphates mobiles sur la surface des laitiers riches en silicium et en calcium réduit sa disponibilité dans les sols, tout en conservant sa disponibilité sous forme de phosphates assimilables par les plantes, augmentant ainsi l'efficacité de son utilisation\*.

En mélangeant des laitiers avec des fumiers, le lessivage des phosphates a ainsi été réduit de 30 à 50%.

En utilisant les seuls laitiers riches en silicates comme filtre, la réduction du lessivage des phosphates a été réduite de 80 à 95% (Matichenkov V., 2006).

## Conclusion

La récente reconnaissance par l'AAPFCO du silicium en tant que « substance bénéfique aux plantes » et les preuves scientifiques des effets bénéfiques du silicium sur les systèmes de culture et sur l'environnement devrait fournir des opportunités supplémentaires pour le développement des usages des laitiers en tant qu'engrais ou autres produits.

Cependant, il est primordial que des acteurs représentatifs de la profession puissent participer activement au développement de

la législation qui pourrait affecter les emplois actuels et futurs des laitiers, en s'assurant que les textes proposés ne soient pas seulement fondés sur la théorie, mais prennent également en compte les propriétés spécifiques des laitiers sidérurgiques et les retours d'expériences existants.

Dans le futur, vont émerger des possibilités importantes de voir les laitiers utilisés pour contribuer à résoudre les problèmes environnementaux et sociétaux actuels tels que la demande croissante de nourriture et de fibres, la réduction du CO<sub>2</sub> atmosphérique, et la réduction des émissions excessives de phosphates dans les eaux continentales.

## Références bibliographiques

Retrouvez l'intégralité des références bibliographiques corrélées à cet article sur notre site Internet : [www.ctpl.info/publications/revue-laitiers-siderurgiques/](http://www.ctpl.info/publications/revue-laitiers-siderurgiques/)  
Reportez-vous à la présentation du numéro 104 de Laitiers Sidérurgiques.

## Annexe 1 – Cas concrêt d'utilisation des laitiers aux USA

### Exemple de cahiers des charges pour l'Etat de la Caroline du Nord

#### Article 8A.

Vente de matériaux d'amendements basiques et de gypses

#### § 106-92.1. Titre de l'Article

Cet Article sera connu comme le « North Carolina Agricultural Liming Materials and Land-plaster Act ». (1979, c.590.)

#### § 106-92.2. Objectif de l'Article

L'objectif de cet Article est d'assurer au producteur, au distributeur, et au consommateur la qualité et la quantité correctes de tous les matériaux d'amendements basiques et de gypses vendus dans cet Etat. (1979,c.590.)

#### § 106-92.3. Définition des termes

Dans le cadre de cet article :

1. « Matériaux d'amendements basiques » : désigne tous les composés d'oxydes, d'hydroxydes, de silicates ou de carbonates de calcium et/ou de magnésium capables de neutraliser l'acidité du sol.
- 1a. « Mélange de matériaux d'amendements basiques et d'engrais » : désigne toute combinaison d'un matériau d'amendement basique avec un seul élément d'apport ou un seul nutriment pour plante.
2. « Marque » signifie le terme, la désignation, la marque commerciale, le nom du produit ou autre désignation spécifique réellement descriptive du produit et sous lesquels le matériau d'amendement basique est offert à la vente.

3. « Vrac » : désigne une forme non conditionnée.
4. « Chaux calcinée » : désigne un matériau, produit à partir de calcaire constitué essentiellement d'oxyde de calcium ou d'une combinaison d'oxydes de calcium et de magnésium.
5. « Calcaire calcique » : désigne un calcaire contenant moins de six pour cent (6%) de magnésium provenant du carbonate de magnésium.
6. « Carbonate de calcium équivalent » : désigne la capacité de neutralisation d'acidité d'un matériau d'amendement basique exprimé en pourcentage de masse de carbonate de calcium.
7. « Calcaire dolomitique » : désigne un calcaire présentant un minimum de six pour cent (6%) de magnésium provenant de carbonate de magnésium.
8. « Finesse » : désigne le pourcentage en masse du matériau passant aux cribles de mailles spécifiées normalisés aux US.
9. « Chaux hydratée » : désigne un matériau, élaboré à partir de chaux calcinée, et constitué essentiellement d'hydroxyde de calcium ou d'une combinaison d'hydroxyde de calcium et d'oxyde et/ou d'hydroxyde de magnésium.
10. « Matériaux d'amendement issu de sous-produits industriels » : désigne tout déchet ou sous-produits industriels contenant du calcium, ou du calcium et du magnésium, sous des formes capables de neutraliser l'acidité du sol.
11. « Label » : désigne tout texte écrit ou imprimé sur ou attaché à l'emballage ou au ticket de livraison qui accompagne les livraisons en vrac.
12. « Gypses » : désigne un matériau contenant du sulfate de calcium.
13. « Calcaire » : désigne un matériau constitué essentiellement de carbonate de calcium, ou d'une combinaison de carbonates de calcium et de magnésium, capable de neutraliser l'acidité du sol.
14. « Marne » : désigne un matériau granulaire ou faiblement cohésif, semblable à de la terre, et largement composé de fragments de coquillages marins et de carbonate de calcium.
15. « Pour cent » ou « pourcentage » s'exprime en relation avec la masse.
16. « Personne » : désigne un individu, un partenariat, une association, une entreprise ou une corporation.
17. « Vente » : désigne tout transfert de titre ou de possession, ou les deux, tout échange ou troc de propriété personnelle tangible, conditionnelle ou autre pour une rémunération payée ou à devoir, incluant chacune des dites transactions dans lesquelles le titre ou la propriété est transféré et devra désigner et inclure de surcroît tout cautionnement, prêt, bail, location ou licence pour utiliser ou consommer une propriété personnelle tangible pour une rémunération payée dans laquelle la dite propriété est transférée au dépositaire, emprunteur, preneur à bail ou licencié(concessionnaire).
18. « Vendre » : désigne l'aliénation, l'échange, le transfert ou le contrat pour tel transfert de propriété pour un prix fixe en numéraire ou son équivalent.
19. « Chaux en suspension » : désigne un produit obtenu par le mélange d'un matériau d'amendement basique agricole avec de l'eau et un agent de suspension.
20. « Tonne » : désigne un poids net de 2 000 livres-poids.
21. « Poids » : désigne le poids d'un matériau non séché, en l'état tel qu'il est offert à la vente. (1979, c.590 ; 1981, c.449, s. 2).

Sous-chapitre 48D – Matériaux d'amendements basiques et gypses  
Section .0100 - Matériaux d'amendements basiques et gypses

#### **02 NCAC 48D .0101 Amendement agricole basique normé<sup>6</sup>**

Les normes pour étiquetage et classification comparative des amendements agricoles sont :  
(1) Chaux calcique ou marnes. Au moins 90% de passant au tamis de 20 mesh ; Au moins 25% de passant au tamis de 100 mesh ; Quatre vingt dix pourcent de carbonate de calcium équivalent est considéré comme un standard auquel sont comparés différents lots de calcaires.

(6) Pour une compréhension du contenu technique de l'article :  
- 10 mesh équivalent à un tamis de 2 mm  
- 20 mesh équivalent à un tamis de 0,85 mm  
- 100 mesh équivalent à un tamis de 0,15 mm

(2) Chaux dolomitique. 90% de passant au tamis de 20 mesh ; 35% de passant au tamis de 100 mesh; Quatre vingt dix pourcent de carbonate de calcium équivalent est considéré comme un standard auquel sont comparés différents lots de calcaire dolomitique.

*Note historique : Authority G.S. 106-92.16*

*Effectif au 1<sup>er</sup> juillet 1980*

*Transféré de T02.11D Effectif au 1<sup>er</sup> janvier 1985*

#### **02 NCAC 48D.0212 Dimensions minimum des tamis**

Pour être acceptables à la vente en Caroline du Nord :

(1) Tous les calcaires vendus, offerts à la vente, ou distribués jusqu'au 1<sup>er</sup> juin 1981 doivent respecter au moins l'une des finesses de mouture indiquées ci-après :

a. 100% de passant au tamis de 10; 40% de passant au tamis de 100 avec une tolérance d'allocation expérimentale de 5% ;

b. Les chaux calciques ou marnes doivent présenter 90% de passant au tamis de 20 et 25% de passant au tamis de 100 alors que les chaux dolomitiques doivent assurer 90% de passant au tamis de 20 et 35% de passant au tamis de 100;

(2) Tous les calcaires vendus, offerts à la vente, ou distribués après le 1<sup>er</sup> juin 1981 doivent respecter au moins l'une des finesses de mouture indiquées ci-après :

a. Chaux calcique ou marnes : Au moins 90% de passant au tamis de 20; Au moins 25% de passant au tamis de 100;

b. Chaux dolomitique : 90% de passant au tamis de 20; 35% de passant au tamis de 100;

c. Les chaux granulaires fines doivent assurer 90% de passant au tamis de 20 et 10% de passant au tamis de 100;

d. Les chaux dolomitiques pelletisées doivent assurer 90% de passant au tamis de 20 et 35% de passant au tamis de 100 avant l'opération de pelletisation ;

e. Les chaux calciques pelletisées doivent assurer 90% de passant au tamis de 20 et 25% de passant au tamis de 100 avant l'opération de pelletisation ;

f. Les chaux pelletisées doivent être fabriquées de façon telle qu'elles s'éteignent dès qu'elles entrent en contact avec l'humidité.

*Note historique : Authority G.S. 106-92.16(2)*

*Effectif au 1<sup>er</sup> juillet 1980,*

*Modifications effectives au 1<sup>er</sup> sept. 1984 et 3 décembre 1980 ;*

*Transféré de T02.11D Effectif au 1<sup>er</sup> janvier 1985*

## Annexe 2 – Exemples d’emploi de laitiers en agriculture

### Développements réalisés par la Société HARSCO

Un laitier d’aciérie de four en filière inoxydable traité, riche en calcium et magnésium, appelé Reclime, a été commercialisé aux Etats-Unis dès 1993. A la suite de l’acquisition par Harsco de la société Excel Minerals, ce co-produit démétallisé a été rebaptisé AgrowSil™ et continue d’être vendu comme amendement agricole calcique sur une zone entourant le site sidérurgique de Server en Pennsylvanie.

Un produit similaire, AgroSilco®, a été fabriqué et vendu au Brésil depuis 2001.

En Afrique du Sud, le produit connu sous le nom de Calmasil™ est également un laitier d’aciérie inoxydable traité par Harsco, mais commercialisé et vendu par un autre fournisseur. Récemment, Harsco a démarré la fabrication d’engrais riches en silicium (Crossover™) aux Etats-Unis et produit actuellement un produit pelletisé similaire en Chine.

Des développements sont actuellement programmés en Inde pour la fabrication et la vente d’engrais pelletisés similaires, riches en silicium.

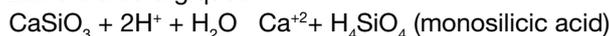
## Annexe 3 – Exemples de limitations de production de gaz à effet de serre (CO<sub>2</sub>)

D’une façon simple, lorsque des laitiers sont employés comme alternative à d’autres matières calciques, les produits de décomposition obtenus ne conduisent pas à la production de CO<sub>2</sub>, ainsi que le montrent les équations chimiques (1) et (2) suivantes :

(1) - Chaux et autres amendements calciques :



(2) - Laitiers sidérurgiques :



Il est également connu que substituer les amendements calciques ou engrais riches en silice d’origine naturelle par des laitiers sidérurgiques devrait conduire à économiser de l’énergie et l’ensemble de la logistique liée à l’extraction de matières premières non pérennes.

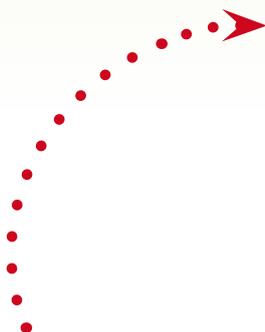
Bien plus intéressant, un autre intérêt potentiel lié à l’utilisation des laitiers réside dans la séquestration du dioxyde de carbone. Schuiling et Krijgsman (2006) ont suggéré que les laitiers, qui contiennent des silicates de calcium et de magnésium, ou d’autres matériaux similaires contenant de l’olivine [(Fe,Mg)<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>], pourraient être utilisés comme des outils performants d’érosion pour réduire les niveaux de CO<sub>2</sub> atmosphérique. Ils comparent cette action à l’altération naturelle qui contrôle les niveaux du CO<sub>2</sub> atmosphérique par la précipitation des carbonates de calcium et de magnésium. Ils poursuivent leur théorie en suggérant l’épandage de poudre d’olivine (qui pourrait avantageusement être constituée de laitiers) sur les terres agricoles et les forêts.

En support à cette théorie, Hartmann et Kempe (2008) font état du fait que l’altération des roches silicatées affecte à la fois les sols et le CO<sub>2</sub> atmosphérique car c’est un puits à carbone important. Ils ont ainsi calculé qu’une quantité potentielle de 65 x 10<sup>6</sup> tonnes de carbone/an pourrait être captée si des roches silicatées finement broyées étaient épandues sur toutes les surfaces cultivées et les forêts de la planète.

**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 CO<sub>2</sub> 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](http://www.ctpl.info)

Nous vous donnons donc rendez-vous sur notre site [www.ctpl.info](http://www.ctpl.info) dès le second trimestre 2013 afin de pouvoir télécharger votre numéro 101.

# Dans les précédents NUMÉROS...

## 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.

*Jérémie Domas : 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.

*Jérémie Domas : Directeur du CTPL*

• **Où sont passés les laitiers en 2009**

Utilisation des laitiers sidérurgiques en 2009 en France.

*Jérémie Domas : 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

*Jérémie DOMAS : 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 !**

Evaluation 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.

*Jérémie Domas : CTPL*

## N° 99 (avril 2012)

• **Bonne route avec les granulats de laitiers EAF !**

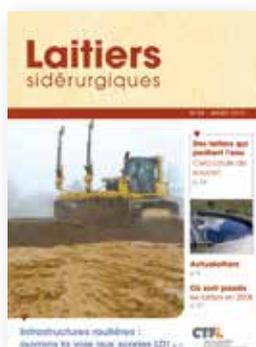
Grèce : Utilisation de laitiers d'aciérie de four électrique en enrobé bitumineux en couche mince anti-dérapante.

*Ioannis Liapis : Civil Engineer, BEng, MSc, DIC, PhD Candidate, AEIFOROS SA  
Spiraggelos Likoydis : Geologist, Director of P.Y.TH. Laboratory, EGNATIA ODOS SA*

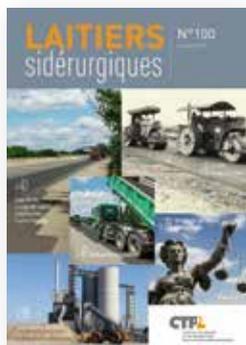
• **Laitiers d'aciérie de conversion : sélection à la source !**

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 : CTPL

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

• **Guide SETRA, à usage des maîtres d'œuvre et des maîtres d'ouvrage**  
Le guide SETRA pour l'acceptabilité environnementale des laitiers sidérurgiques en technique routière  
Jérémy Domas : CTPL

### • Réalisations remarquables

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

## N° 101 (juillet 2013)

• **Une valorisation en béton !**  
Valorisation en granulats pour béton des laitiers provenant de l'élaboration des aciers inoxydables en filière électrique  
Gildas ADEGOLOYE : L2MGC, Université de Cergy-Pontoise  
Anne-Lise BEAUCOUR : L2MGC, Université de Cergy-Pontoise  
Sophie ORTOLA : L2MGC, Université de Cergy-Pontoise  
Albert NOUMOWE : L2MGC, Université de Cergy-Pontoise

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

Jacques Reynard : CTPL

• **Des laitiers très protecteurs**  
Valorisation des laitiers LAFE comme granulats dans des blocs d'enrochement en béton

Benjamin LACLAU, NOBATEK  
Bruno BOUQUET, T.S.V.

## N° 102 (juin 2014)

• **Les produits laitiers, c'est bon pour la santé !**  
Evaluation des risques pour la santé humaine liés à l'utilisation des laitiers sidérurgiques en construction routière  
Dr Deborah Proctor

• **Des laitiers bons pour le service !**  
Evaluation des risques sanitaires liés à l'utilisation de laitiers de convertisseur  
Laurent BUTEZ - SGA

## N° 103 (octobre 2014)

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

• **Que sont devenus les laitiers en 2013**  
Production et devenir des laitiers sidérurgiques en 2013 en France.  
Jérémy Domas : CTPL

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



**LAITIERS**  
sidérurgiques

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