

Laitiers d'aciérie

Mise à jour de la version : 9/08/13

1.	Définition.....	1
2.	Lois, normes et guides.....	2
3.	Origine, élaboration, stockage	4
4.	Caractéristiques physico-chimiques.....	10
5.	Caractéristiques géotechniques.....	12
6.	Caractéristiques environnementales.....	18
7.	Aspects sanitaires.....	20
8.	Usages (Types d'infrastructures)	20
9.	Références bibliographiques.....	22
10.	Auteurs et relecteurs.....	25

1. Définition

Les laitiers sidérurgiques sont des matières minérales artificielles produites par l'industrie sidérurgique. Ces matériaux sont co-générés sous forme liquide (à environ 1500°C) en même temps que la fonte sidérurgique (laitiers de haut-fourneau) ou que l'acier (laitiers d'aciérie).

Dans les hauts-fourneaux (filrière dite « intégrée »), le minerai de fer, composé d'oxyde de fer et de gangue minérale, est réduit par le carbone du coke (issu de la cuisson de la houille à haute température).

La séparation des éléments non ferreux (chaux, silice, alumine) de la fonte se fait par la différence de densité. Les éléments non ferreux créent les laitiers de haut-fourneau (LHF), séparés de la fonte sidérurgique grâce à un siphon.

Les laitiers d'aciérie sont des co-produits¹ de l'élaboration de l'acier. Selon la filière d'élaboration, on distingue les deux grands types suivants:

- **Les laitiers d'aciérie de conversion** : (*LAC, ou BOF slag : Basic Oxygen Furnace Slag*) issus de l'affinage de la fonte en acier dans un convertisseur à oxygène. Un convertisseur est une cornue en acier, à revêtement intérieur réfractaire, dans lequel on brûle le carbone et certains autres composants de la fonte, tels le silicium, le manganèse, le phosphore, le soufre en utilisant l'énergie contenue dans celle-ci pour la transformer en acier. Depuis 1949, on souffle couramment de l'oxygène pour activer la réaction. Selon la méthode de soufflage d'oxygène on parlera de **laitiers LD** (Linz et Donawitz, inventeurs du procédé) lorsque cela est fait par le haut du convertisseur (seul procédé employé en France) ou de **laitiers LWS** (Loire-Wendel-Sprunck) ou **OBM** (Oxygen Boden Maxhütte) lorsque l'insufflation d'oxygène se fait par le bas. A ce jour, seul le procédé LD est utilisé en France.
- **Les laitiers d'aciérie électrique** : (*LAFE ou EAF slag = Electric Arc Furnace slag*) issus de la production d'acier par la refonte de ferrailles dans un four à arc électrique principalement².

¹ Co-produits = substances ou matières co-générées

Les constituants majeurs et les impuretés des laitiers sont fonction de la matière première (fonte, ferraille,...) utilisée dans le process, des matières ajoutées au cours du processus de fabrication (chaux, magnésie) mais également de la nuance d'acier élaborée (éléments d'ajout pour l'obtention d'alliages).

Par conséquent la composition chimique des laitiers peut être assez variable en fonction des typologies de process (laitiers de convertisseurs, laitiers d'aciérie électrique d'élaboration d'aciers carbone, inoxydables, ou alliés). Néanmoins, au sein d'un même site, et même d'une même famille, cette composition chimique reste assez homogène.

Ces compositions chimiques associées aux process (cf. § 4.1.) confèrent au matériau des caractéristiques différentes : par exemple, les laitiers d'aciérie électrique sont très peu ou pas sujets aux problèmes de stabilité volumique (évolution granulométrique, gonflement) par rapport aux laitiers d'aciérie de conversion, compte tenu de leurs teneurs respectives en chaux et magnésie libres (cf. § 5.3.).

2. Lois, normes et guides

2.1. Réglementation Déchets

Conformément aux dispositions des articles R.541-7 à R.541-10 du Code de l'Environnement, les laitiers bruts issus de l'industrie sidérurgique sont classés, en fonction des sites, sous les codes « 10 02 01 déchets de laitiers de hauts-fourneaux et d'aciéries » ou « 10 02 02 laitiers non traités ». Les laitiers d'aciérie appartiennent à la catégorie des « déchets provenant de procédés thermiques » (10). Ce sont des déchets non dangereux qui, pour la plupart,, répondent aux spécifications techniques des produits de construction normalisés.

2.2. Guides techniques et notes d'information

La publication par le SETRA en octobre 2012 du Guide d'application « *Acceptabilité environnementale de matériaux alternatifs en technique routière – Les laitiers sidérurgiques* » permet maintenant des conditions facilitées et sécurisées de commercialisation et d'utilisation des laitiers en technique routière.

Un certain nombre d'ouvrages font référence aux laitiers d'aciérie. La liste qui suit n'est pas exhaustive mais reprend les ouvrages récents :

- **Administration centrale**
 - Guide SETRA « Acceptabilité de matériaux alternatifs en technique routière – Evaluation environnementale » (SETRA, Réf. 1101, mars 2011) ³,
 - Guide SETRA « Acceptabilité de matériaux alternatifs en technique routière – Les laitiers sidérurgiques » (SETRA, Réf.1226, octobre 2012).

² Dans la fabrication d'aciers alliés, les laitiers AOD sont souvent assimilés à des laitiers de four

³ L'existence du Guide méthodologique du SETRA « Acceptabilité de matériaux alternatifs en technique routière – Evaluation environnementale » (SETRA, Réf. 1101, mars 2011) a servi de base à l'élaboration du guide spécifique aux laitiers, qui est auto-porteur et permet de se passer de cet ouvrage méthodologique général.

– **Services déconcentrés**

- Guides Techniques Régionaux relatifs à la valorisation des déchets et co-produits industriels (PREDIS Nord Pas-de-Calais, juillet 2002) :
 - Guide générique sur les laitiers de haut-fourneau,
 - 3 Guides spécifiques relatifs aux laitiers d'aciérie électrique (Ascométal usine des Dunes, LME-Trith et V&M Saint-Saulve).
- Guides d'utilisation des matériaux lorrains en technique routière :
 - [Guide laitier d'aciérie de four électrique](#) (CETE Est, 2010),
 - [Guide laitier haut fourneau](#) (CETE Est, 2010).

2.3. Normalisation

2.3.1. Normes Produits

L'ensemble des normes (produits) granulats concernent également les laitiers d'aciérie. La liste est rappelée en 4.2.2.

La norme NF P 18-545 (octobre 2011) « Granulats. Éléments de définition, conformité et codification » synthétise l'ensemble des caractéristiques et des codifications adaptées au marché français et aux différents usages des matériaux utilisés comme granulats.

La Marque NF est une marque de qualité, non obligatoire et d'application volontaire, qui démontre la conformité du produit à la norme NF P 18-545, et exige donc l'existence d'une FTP par produit.

Les normes PR EN 13282-1 et NF EN 14227-12 concernent l'usage en Liant Hydrauliques Routiers des laitiers d'aciérie.

2.3.2. Normes d'essais

Les caractéristiques techniques (géométriques, mécaniques et chimiques) sont à déterminer au cas par cas. On se référera entre autres aux normes suivantes (quasiment l'ensemble des normes d'essais couvertes par les normes produit).

Ci-dessous, quelques normes particulières relatives aux laitiers d'aciérie ou appliquées à ces derniers :

- NF P 11-300, septembre 1992. Exécution des terrassements. Classification des matériaux utilisables dans la construction des remblais et des couches de forme d'infrastructures routières
Les sous produits industriels, ainsi que les sols organiques sont classés sous la rubrique F. Les laitiers d'aciéries sont inscrits dans la classe F₉, nommée « autres sous-produits industriels ».
- NF EN 1744-1 (Oct. 2010) « Essais visant à déterminer les propriétés chimiques des granulats - Partie 1 : analyse chimique ». Cette norme définit les modalités d'essai relatives à la détermination des constituants chimiques et à l'expansion volumique des laitiers d'aciérie lorsqu'ils sont utilisés comme granulats.

- NF EN 12457 parties 1 à 4 (Déc. 2002) : Caractérisation des déchets – Lixiviation – Essai de conformité pour lixiviation des déchets fragmentés et des boues.
- NF CEN/TS 14405 (2005) Caractérisation des déchets – Essai de comportement à la lixiviation – Essai de percolation à écoulement ascendant (dans des conditions spécifiées). Cet essai permet de caractériser et d'évaluer les constituants pouvant être lixiviés à partir de déchets.

3. Origine, élaboration, stockage

Il existe plusieurs process de génération pour les laitiers d'aciérie, dont les **laitiers d'aciérie de conversion (LAC)** et les **laitiers d'aciérie de four électrique (LAFE)** représentent la majeure partie des volumes.

En parallèle, l'affinage poussé de l'acier, réalisé en poche quels que soient les process, génère d'autres types de laitiers sidérurgiques, en quantité moindre, communément appelés « laitiers de métallurgie secondaire » ou « laitiers de poche ».

De même, la fabrication des aciers inoxydables génère un troisième type de laitiers (intermédiaire aux autres), appelés laitiers AOD, correspondant à la phase de décarburation et désulfuration de l'acier. Cette étape a lieu dans une « cornue AOD » au sein des aciéries fabriquant des aciers inoxydables. Pour des raisons de similarité de composition, ces laitiers sont souvent assimilés à des laitiers de four.

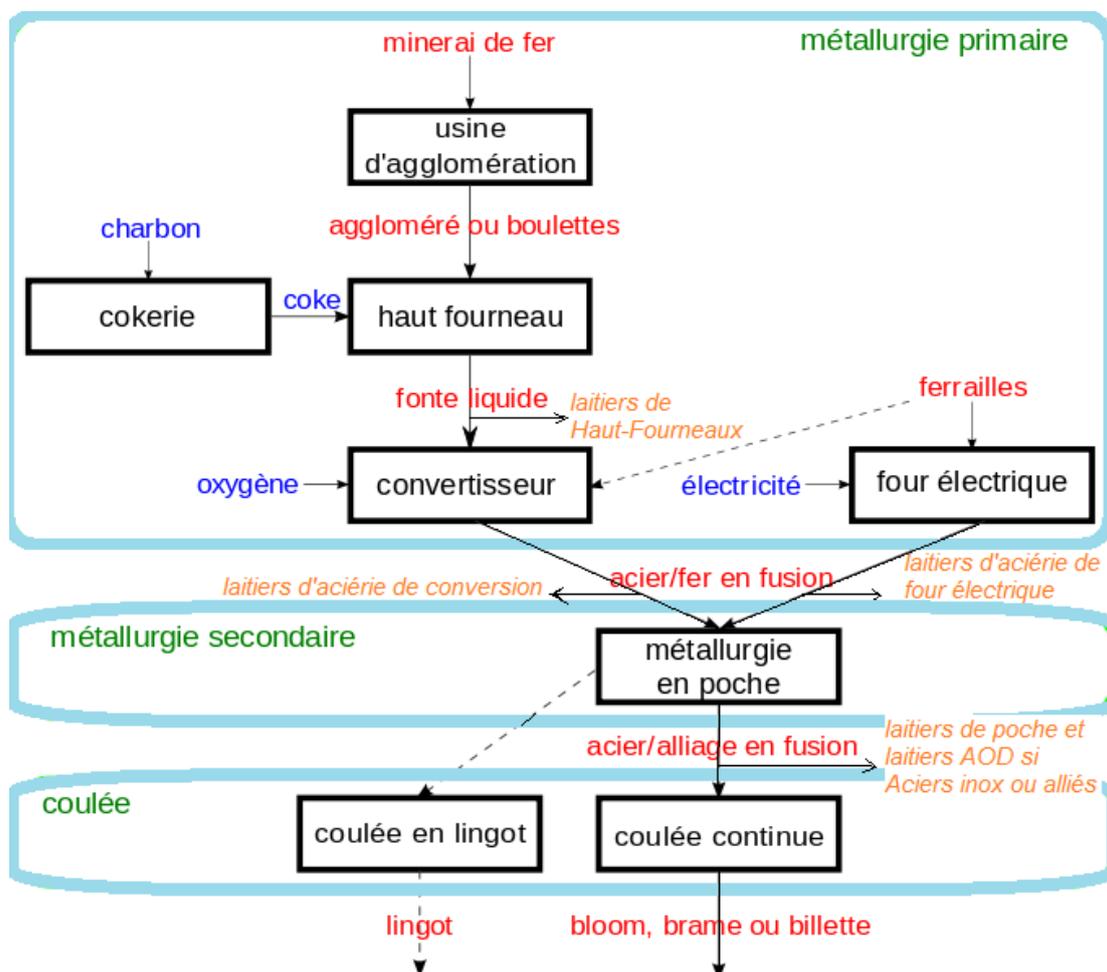


Figure 1 :

3.1. Les laitiers d'aciérie de conversion

Les laitiers d'aciérie de conversion (LAC) sont issus de la transformation par décarburation de la fonte sidérurgique en acier. Cette filière de fabrication est indifféremment appelée :

- Filière « fonte »,
- Filière « intégrée »,
- Filière à chaud.

Le carbone contenu dans la fonte la rend cassante. C'est pourquoi elle est pour la plupart des usages transformée en acier après décarburation par injection d'oxygène afin d'en extraire le carbone (sous forme de CO et CO₂).

Le schéma suivant illustre le principe de production des laitiers LD (Insufflation de l'oxygène par le haut du convertisseur) au sein d'un convertisseur.

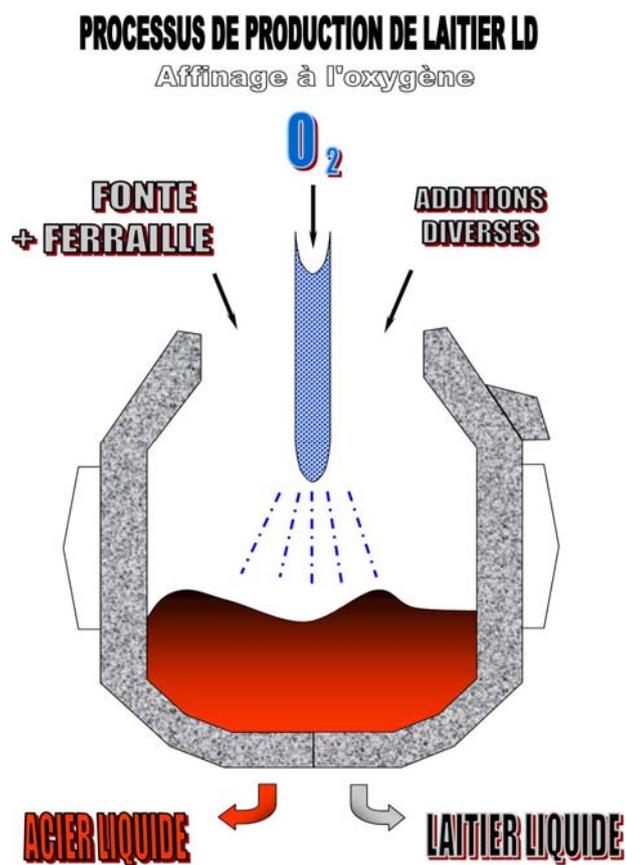


Figure 2 :

Lors de cette phase, de la chaux est introduite dans le convertisseur. La chaux introduite associée à l'injection d'oxygène permet de transformer la fonte liquide en acier liquide en assurant simultanément l'élimination de C, Si, Mn, P et S par oxydation et en favorisant l'élévation de température nécessaire pour passer de la fonte liquide (1250°C en moyenne) à l'acier liquide (1600°C en moyenne).

Les oxydes produits contribuent, avec la chaux introduite, à la formation d'un laitier de densité plus faible que le métal liquide. Les « laitiers de conversion », qui surnagent à la surface du métal liquide, sont récupérés par séparation basée sur la différence de densité entre les deux matières (6,8 pour la fonte, 7,8 pour l'acier et 2,5 à 3,0 pour les laitiers).

L'injection de chaux magnésienne (ou magnésie, MgO) permet de protéger les briques réfractaires du convertisseur, constituées elles-mêmes de magnésie. Elle limite l'érosion de ces briques provoquée par l'acidité de la silice du laitier. Le magnésium injecté est ainsi consommé et se retrouve dans le laitier.

Le laitier de convertisseur, après soutirage, est ensuite refroidi en suivant des procédures particulières selon les sites. Ce refroidissement se fait en masse, généralement à l'air libre, dans des fosses dédiées au refroidissement. Cependant, il peut également faire l'objet d'un refroidissement plus rapide, par « voie humide », dans des bassins d'eau (ennoyage) ou par aspersion (arrosage plus ou moins intensif). Ce processus de refroidissement contrôlé et maîtrisé permet de réduire la réactivité de la chaux et ainsi d'améliorer les caractéristiques géotechniques des laitiers, en particulier vis-à-vis des réactions d'expansion volumique. Ce procédé permet également un « glaçage⁴ » de la matière permettant d'améliorer son comportement environnemental.

Différentes nuances d'aciers peuvent être élaborées par affinages successifs. Ils seront ensuite laminés à chaud ou à froid pour donner des produits longs (rails...) ou plats (tôles...).

3.2. Les laitiers d'aciérie de four électrique (LAFE)

Le four électrique à arc électrique permet la fabrication d'acier à partir d'une charge constituée essentiellement de ferrailles de récupération sélectionnées (copeaux d'usinage, ferrailles broyées, ferrailles de démolitions, rebuts de production sidérurgiques, etc..).

On peut distinguer deux principales filières d'élaboration d'aciers en filière électrique :

- Aciérie électrique pour l'élaboration d'aciers carbone et faiblement alliés,
- Aciérie électrique pour l'élaboration d'aciers inoxydables et fortement alliés.



Figure 3 : Four aciérie électrique, site V&M (Sources CTPL)

⁴ On ne peut pas parler de vitrification de la matière car seule sa surface est affectée

Les laitiers majoritairement issus de ces deux types de productions sont appelés laitiers d'aciérie de four électrique (LAFE) ou « laitiers de four ». Ces laitiers représentent une masse de 90 à 130 kg de matière minérale par tonne d'acier produit.

Additionnés à la ferraille, des réactifs spécifiques (chaux vive par exemple), mais en quantité moins importante que pour les laitiers de convertisseur à oxygène, sont également introduits dans le four. Ces réactifs permettent une meilleure oxydation des éléments à éliminer se trouvant dans la matière première ainsi que des économies d'énergie par abaissement du point de fusion.

Après fusion des éléments introduits dans le four, le laitier contenant les oxydes, plus léger (3,0 à 3,5), surnage au-dessus du métal (7,5 à 8,0). Cette différence de densité permet de séparer par gravité l'acier du laitier au moyen d'un système de goulottes ou par écrémage.



Figure 4 : Génération d'un laitier d'aciérie électrique, site Ascométal de Fos-sur-Mer (Sources CTPL)



Figure 5 : stock de laitier d'aciérie électrique, site Ascométal de Fos-sur-Mer (Sources CTPL)

Le laitier est alors dirigé vers une fosse pour y être refroidi (figure 4), le refroidissement étant parfois accéléré par un arrosage (plus ou moins intensif) à l'eau. Après solidification partielle, le laitier est ensuite extrait des fosses (déroctage) pour être évacué vers une zone de stockage au pied des installations. Le laitier brut tout-venant (figure 5) peut alors être utilisé en l'état pour des usages rustiques et peu sophistiqués, (remblais, terrassements, plateformes industrielles non porteuses, ...), ou être orienté vers des plateformes d'élaboration de matériaux plus aboutis (granulats) pour des usages plus nobles (enrobés, bétons ...).

En fonction des cas et des caractéristiques, les laitiers peuvent également subir une période de maturation, durant quelques mois, avant ou après leur transformation et leur utilisation.

3.3. Élaboration des granulats : filière de conversion ou électrique

Selon les usines, les procédés d'élaboration des produits finis diffèrent, en intégrant plus ou moins des phases de :

- tri à la source,
- refroidissement contrôlé,

- mise en stock tampon pour une période de maturation (3 à 12 mois) avec ou sans arrosage et/ou retournement des stocks,
- concassage, déferrailage et criblage.

Les laitiers de convertisseur à oxygène ou les laitiers d'aciérie électrique contiennent encore en général une quantité significative de fer (cf. § 4.1.), soit sous forme d'oxydes (FeO, Fe₂O₃), soit directement encore sous forme de fer métal (Fe). En fonction des cas (composition, types de matériaux élaborés, usages finaux, ...), le déferrailage peut constituer une étape économiquement très rentable dans l'élaboration des granulats de laitiers d'aciérie, la majeure partie du fer récupéré (« scraps ») peut alors être réinjecté directement dans la filière sidérurgique amont ou commercialisé sur le marché extérieur.

Le laitier issu de cette première opération de déferrailage peut alors être criblé. Un passage sous une bande magnétique appelée « over band » permet d'en extraire les parties métalliques de taille plus petite afin d'améliorer encore l'économie de la filière.

Le laitier peut ensuite faire l'objet d'une phase de criblage et/ou de concassage, afin d'obtenir des fractions granulométriques plus fines, adaptées aux usages plus nobles.

En fonction des cas, le poids des produits de déferrailage représente entre 5 à 15% de l'ensemble des laitiers bruts (« tout-venant ») qui quittent l'aciérie.



Figure 6 : Site d'élaboration des laitiers d'aciérie électrique de LME-Trith (Sources CTPL)



Figure 7 : Stock de laitiers de conversion 0/31.5mm, site de Schoeneck

Les laitiers d'aciérie, déferrillés ou non, peuvent alors être, selon leur origine, leurs caractéristiques, et selon la demande locale :

- utilisés bruts pour la réalisation de couches de pré-chargement, de remblais, plateformes et pistes de chantier, de protection de rives, de digues et autres ouvrages soumis à l'érosion hydraulique,
- utilisés en terrassement (traitement de sols en place)
- utilisés en technique routière (remblai, couche de forme, matériaux drainant, granulats dans des couches bitumineuses),
- utilisés comme amendements sidérurgiques basiques pour l'agriculture,

- utilisés comme constituants pour la fabrication de liants hydrauliques (LHR et ciments ...),
- utilisés comme matières premières dans l'industrie de l'isolation (laine de roche) ou de la fabrication du verre.

Un exemple de processus d'élaboration de fractions granulométriques fines (SGA pour le site ArcelorMittal de Dunkerque) est schématisé en Figure 8 :

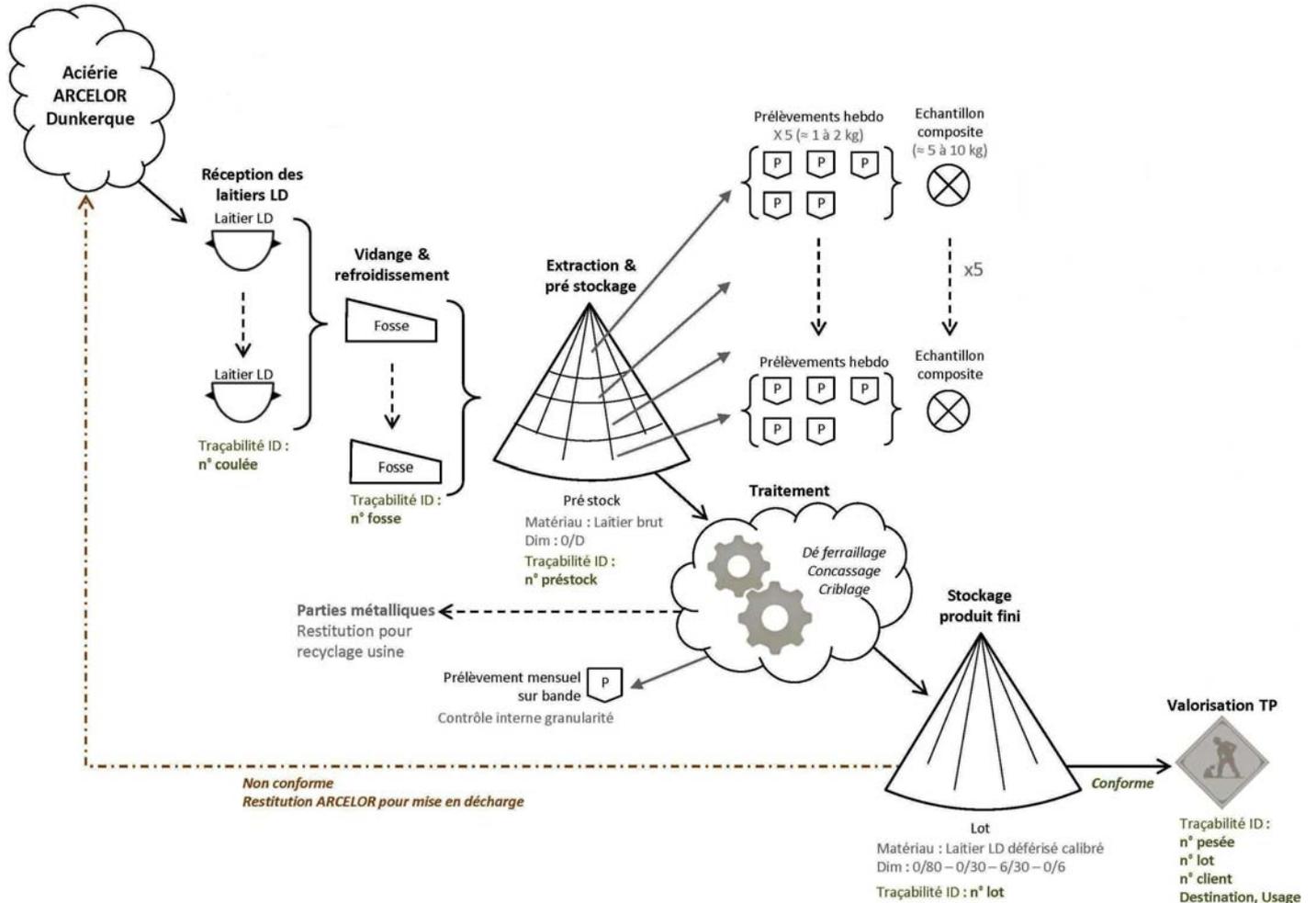


Figure 8 : Schéma d'élaboration et de contrôle des fractions granulométriques fines des laitiers d'aciérie de conversion du site ArcelorMittal de Dunkerque (Sources SGA)



Figure 9 : Illustrations d'une Centrale de concassage et criblage de laitiers d'aciérie électrique (Source : T.S.V./Durruty, Site de Boucau (64))

4. Caractéristiques physico-chimiques

4.1. Analyses chimiques

Les résultats des analyses des laitiers diffèrent très sensiblement d'une usine à l'autre compte tenu de la variété des process de fabrication employés (filrière intégrée, filière ferrailles) et des types d'aciers élaborés.

Le Tableau 2 ci-dessous présente les fourchettes de valeurs obtenues pour les laitiers de conversion et de filière électrique (Sources : guide SETRA).

Les analyses chimiques montrent que les éléments majeurs sont représentés par le calcium, le silicium, le fer, et dans une moindre mesure, par l'aluminium, le magnésium et le manganèse.

Constituants chimiques typiques	Teneur en % Laitiers d'aciérie de conversion	Teneur en % Laitiers EAF aciers carbone	Teneur en % Laitiers EAF aciers inox et alliés
CaO	40-60	25-45	25-55
SiO ₂	10-15	15-25	20-30
Al ₂ O ₃	1-5	5-13	2-10
Fe ₂ O ₃	5-7	-	-
FeO	10-25	25-45	1-10
MgO	1-8	5-10	4-15
MnO	-	3-8	1-5
P ₂ O ₅	0,5-3	0,2-1	-
Cr ₂ O ₃	-	1-3	1-15
F total	-	-	1-5
TiO ₂	-	-	0,5-2

Tableau 2 : Teneurs en constituants majeurs des laitiers d'aciéries de convertisseur à oxygène et électrique

4.2. Caractéristiques minéralogiques

4.2.1. Filière convertisseurs à oxygène

La structure et la composition minéralogique du laitier sont assez hétérogènes selon le procédé utilisé et sa conduite. Mais en raison des conditions de pressions et de températures mises en jeu et de la nature toujours identique des composés majeurs utilisés, la variabilité des phases minérales obtenues est limitée à quelques espèces (Boudonnet, 1994 ; Chaurand, 2006) :

- la bélite, silicate bicalcique (Ca₂SiO₄) ou C₂S en notation cimentière, contenant en solution solide du phosphate tricalcique C₃P* qui se substitue au silicium (Ca₃PO₇) ;
- l'alite, silicate tricalcique (Ca₃SiO₅) ou C₃S en notation cimentière ;
- les ferrites de calcium, sous forme principalement de CaFeO₂ (CF en notation cimentière) ou Ca₂Fe₂O₅ (C₂F en notation cimentière), très stables et contenant en solution solide de l'aluminium, du chrome, du vanadium ;
- Des phases de type wustite (FeO), sous forme complexe en solution solide formée à partir d'autres oxydes que le pôle pur FeO, où des substitutions sous forme d'oxydes MnO (manganosite), MgO (périclase) et CaO (chaux) sont possibles, Fe_{1-x-y-z}(Mn_x,Mg_y,Ca_z)O ;
- la chaux libre CaO, donnant par hydratation de l'hydroxyde de calcium ou portlandite Ca(OH)₂ et du carbonate de calcium (CaCO₃) après piégeage du CO₂ de l'atmosphère ; cette réaction correspond à la réaction d'expansion volumique.
- l'oxyde de magnésium sous forme de périclase [MgO], donnant sur les laitiers vieillis de la brucite [Mg(OH)₂] susceptible de se carbonater en magnésite [MgCO₃].

4.2.2. Filière électrique

Selon l'origine des laitiers, l'étude minéralogique fait principalement apparaître des composés de type silicate bicalcique et aluminosilicate de calcium, associés à des oxydes de fer et des oxydes de la famille des spinelles et des ferrites de calcium.

Dans les laitiers de four issus de la filière électrique, le taux de chaux libre résiduelle $\text{CaO} + \text{Ca(OH)}_2$ exprimé en équivalent CaO se situe aux alentours de 1% sur la fraction 0/20 mm du tout-venant (Détermination par la méthode Leduc, essai normalisé NF EN 1744-1 (Oct. 2010))

5. Caractéristiques géotechniques

5.1. Caractéristiques intrinsèques

Les caractéristiques intrinsèques des laitiers d'aciéries peuvent être variables, compte tenu des fluctuations dans le process de fabrication de l'acier (filiales d'aciéries de convertisseur ou électrique), des nuances d'acier élaborées et de la teneur résiduelle en parties métalliques.

Les fourchettes des valeurs présentées dans le tableau 3 sont établies pour des laitiers de convertisseurs à oxygène et de filière électrique de fraîche production. Ces fourchettes sont plus ou moins larges en fonction des paramètres, démontrant la diversité des caractéristiques des « laitiers d'aciérie ». Cependant, les données restent généralement très homogènes pour une production issue d'un site particulier.

Caractéristiques intrinsèques	Norme d'essai	Laitiers d'aciérie de conversion ⁵	Laitiers d'aciérie de four électrique ³
Masse volumique réelle	NF EN 1097-4	2,9 à 3,5	3,2 à 3,6
Résistance à la fragmentation, en % (Los Angeles, LA)	NF EN 1097-2	10 à 25	10 à 25
Résistance à l'usure, en % (Micro-Deval, MDE)	NF EN 1097-1	6 à 20	6 à 15
Résistance au Polissage Accéléré (PSV)	NF EN 1097-8	Pas de données	56 à 68
Taux d'expansion à la vapeur, en %	NF EN 1744-1 §19-3 (Oct. 2010)	0,1 à 15	<3,5

Tableau 3 : Fourchettes des caractéristiques géotechniques des laitiers d'aciéries en filiales convertisseur et électrique (Sources : adhérents CTPL)

La première spécificité des laitiers d'aciérie (de conversion ou électrique) est leur masse volumique, qui est supérieure de 20 à 30% environ à celle des granulats naturels. Elle doit être prise en compte dans les calculs de transport.

⁵ Les valeurs sont présentées à titre informatif

La variabilité des caractéristiques peut être particulièrement sensible au sein de la famille des laitiers d'aciérie de convertisseur, spécifiquement en ce qui concerne le taux d'expansion volumique des laitiers. Ceci doit être rattaché aux méthodes de gestion et aux opérations menées dès la génération des laitiers afin de maîtriser les volumes de chaux et de magnésie libres qui peuvent se former dans les laitiers au moment du refroidissement (cf. § 5.3.). C'est une des raisons (et également par manque de retours d'expériences de chantiers) qui explique qu'en Lorraine, il n'a pas été possible de rédiger un guide unique pour l'utilisation des laitiers d'aciérie de conversion en technique routière. Un long travail de collecte d'information a abouti à la rédaction de deux monographies distinctes, chacune correspondant à une production (Völklingen et Dillingen).

Les laitiers peuvent contenir des quantités variables de chaux et de chaux libre, en fonction du processus d'élaboration et de la qualité de la chaux introduite au sein de l'installation sidérurgique. En ce qui concerne les laitiers de convertisseur à oxygène, la teneur en CaO libre peut parfois atteindre jusqu'à 15% (lors d'incidents de soufflage).

Pour la plupart des laitiers d'aciéries électriques, la teneur en chaux libre résiduelle, (CaO +Ca(OH)₂), exprimée en CaO mesurée selon la norme NF EN 1744-1 chapitre 18 (« Méthode Leduc ») est relativement faible et varie de 0,1 à 1,2 %. Il est néanmoins recommandé de réaliser l'essai de détermination de la teneur en chaux libre régulièrement afin de s'assurer des caractéristiques de la production des LAFE produits, et de l'absence de risques d'expansion volumique.

5.2. Caractéristiques de fabrication

Les caractéristiques de fabrication des granulats de laitier, quant à elles, dépendent du fonctionnement des installations de concassage et criblage, au même titre que varient celles des granulats naturels. On signalera cependant que ces matériaux peuvent avoir des valeurs de propreté superficielle au-delà de celles habituellement requises pour les gravillons, en raison des éléments fins issus du concassage qui ne sont pas éliminés lors du criblage⁶. Un lavage peut alors s'avérer nécessaire pour certains usages, comme l'utilisation pour les enduits superficiels.

Enfin, il faut rappeler que pour les utilisations des laitiers d'aciérie comme granulats, respectant les spécifications de la norme NF P 18-545, les producteurs sont tenus de fournir à leurs clients une Fiche Technique Produit (FTP), indiquant les diverses caractéristiques des granulats ainsi qu'une étiquette CE lorsque les granulats sont vendus pour un usage : par exemple marquage CE selon la norme NF EN 13043 pour un usage des granulats en enrobé, etc...

5.3. Expansion volumique

5.3.1. Mécanismes et détermination de l'expansion volumique

L'expansion volumique éventuelle, qu'on peut parfois rencontrer pour certains laitiers d'aciérie⁷ se traduit généralement par deux phénomènes :

⁶ Les fines produites/libérées lors de l'élaboration des granulats laitiers ne sont pas des argiles

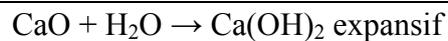
⁷ Les laitiers de haut-fourneau sont stables, ainsi que la majorité des laitiers de four électrique.

- l'évolution granulométrique du laitier par éclatement de certains grains,
- le gonflement du laitier en masse.

Les causes de cette expansion volumique, principalement connue pour les laitiers de convertisseur à oxygène, sont l'hydratation de la chaux (CaO) et de la magnésie (MgO) libres potentiellement présentes dans ces laitiers.

De leur côté, les laitiers d'aciérie électrique, disposant plus rarement de chaux et de magnésie libres, ne sont pas (ou peu) sujets à cette expansion volumique.

L'hydratation de la chaux libre s'accompagne d'une augmentation de "volume solide", d'où une expansion. Ce phénomène s'explique par une modification de la structure cristalline, la masse molaire augmente (de 56 g pour CaO à 74g pour Ca(OH)₂), alors que la masse volumique réelle du solide diminue (de 3.2 à 3.4 g/cm³ pour CaO à 2.2 à 2.4 g/cm³ pour Ca(OH)₂).



Deux types d'essais permettent de déterminer le potentiel d'expansion des laitiers d'aciérie, soit en suivant la chaux libre, soit directement l'expansion volumique :

- La mesure de la teneur en chaux libre est réalisée selon la norme NF EN 1744-1 chapitre 18 (Oct. 2010), Le produit, broyé à 80µm, est mis en suspension avec agitation dans une solution aqueuse sucrée. La chaux, sous ses deux formes CaO et Ca(OH)₂, est ainsi solubilisée. L'extraction à l'eau sucrée permet de doser la chaux sous ses deux formes, CaO et Ca(OH)₂, et doit être complétée (par analyse thermogravimétrique) pour accéder à la valeur de la chaux libre seule (CaO).
- Le **test d'expansion à la vapeur** (ou « steam test »), réalisé selon la norme NF EN 1744-1 Art. 19.3 (Oct. 2010), permet de mesurer expérimentalement le taux de gonflement (en pourcentage) des matériaux reconstitués selon la courbe granulométrique théorique de Fuller.
L'échantillon (environ 4,5 kg) est compacté dans un moule, permettant de disposer d'éprouvettes homogènes en densité, sans attrition ni ségrégation du matériau. Un flux de vapeur traverse l'échantillon, pour une durée comprise entre 24 et 168 heures. L'augmentation de volume est détectée par l'intermédiaire d'un comparateur placé au centre de la face supérieure de l'échantillon, en fonction du temps.
Au terme de l'essai, l'expansion volumique est calculée en pourcentage par rapport au volume initial de l'éprouvette.

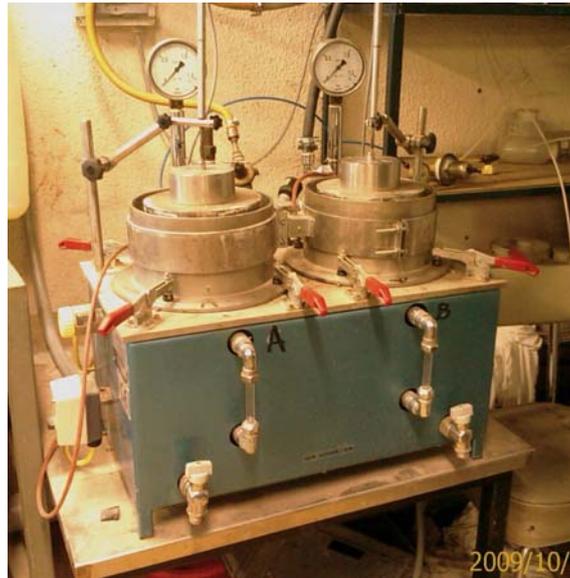


Figure 10 : Photo de l'appareil d'expansion à la vapeur
(Sources : CETE de l'Est)

L'hydratation de la magnésie (MgO) peut aussi être considérée comme une cause possible d'une expansion volumique des laitiers (Boudonnet, 1996). L'augmentation de volume qui en résulte est d'ailleurs plus importante pour la magnésie (environ 1,3 fois) que celle consécutive à l'hydratation de la chaux.

Toutefois, les données concernant cette instabilité sont rares en raison de l'inexistence d'une méthode fiable permettant de mesurer la quantité de magnésium libre dans les laitiers. C'est pourquoi il est important de réaliser régulièrement le test d'expansion à la vapeur pour les laitiers d'aciérie de conversion.

5.3.2. Maîtrise de l'expansion volumique

Les travaux présentés dans ce paragraphe décrivent les différentes possibilités de maîtriser⁸ l'expansion des laitiers d'aciérie de conversion, afin de faciliter leur(s) usage(s) en technique routière et plus largement en génie civil.

Les possibilités d'actions se situent à trois niveaux :

- **Au niveau du process de génération**, où trois possibilités existent :
 - o Maîtrise de la composition et tri à la source : Le laitier d'aciérie de conversion, co-généré avec l'acier au sein du convertisseur, fait l'objet de mesures de contrôle quant à sa composition chimique en constituants majeurs (CaO, FeO, MgO, MnO, SiO₂, Al₂O₃, P₂O₅, S et TiO₂). Par exemple, sur le site Arcelormittal de Fos-sur-Mer, c'est près de 15 000 analyses qui ont été réalisées entre 2006 et 2010.

La réalisation des analyses de la composition chimique du laitier liquide par prélèvement au cœur du convertisseur permet également d'estimer la teneur en chaux (CaO) de ces matériaux.

⁸ Il est préférable de parler de « maîtriser » ou de « limiter » que de « supprimer » puisque les normes permettent d'employer des laitiers présentant des taux d'expansion allant jusqu'à 10%

Cette évaluation est rendue possible par l'utilisation de modèles géochimiques mis au point par le centre de recherche de la sidérurgie de Maizières-les-Metz.

En fonction des teneurs prévisionnelles en chaux des laitiers, ils sont dirigés vers des fosses de refroidissement spécifiques, cette sélection permettant d'optimiser le bénéfice associé à la valeur économique de la chaux contenue dans ces laitiers :

- Les hautes teneurs en chaux peuvent alors être destinées à la fabrication de liants hydrauliques, d'amendements ou d'engrais agricoles basiques (normes NF U 44-001 et NF U 44-203), ou dédiés pour les applications de traitement de sols (NF EN 14227-12), ou plus généralement toute application pour laquelle une teneur en chaux minimum la plus élevée possible est essentielle,
 - Les teneurs moyennes et faibles seront réservées aux usages en technique routière, en fonction des spécifications normatives relatives à l'expansion volumique autorisée pour les granulats de laitiers concernés (Cf. § 5.3.3.)
- Ajout de sable (siliceux) dans le laitier encore en fusion : dans ce cas, la chaux (CaO) se combine avec la silice (SiO₂), afin de former lors du refroidissement et de la cristallisation du laitier des silicates de calcium (Ca_xSi_yO_z) plus ou moins complexes.

Cependant, ce processus réalisé « à chaud » nécessitant une réaction avec le laitier de convertisseur encore liquide est susceptible de générer des risques industriels à prendre en compte au niveau de l'installation sidérurgique. A ce jour, il n'est pas appliqué en France sur les sites.

- Refroidissement contrôlé : des techniques de refroidissement contrôlé du laitier, en particulier par refroidissement rapide à l'eau, sont également pratiquées sur certains sites sidérurgiques allemands (Völklingen), dont les laitiers sont valorisés en partie sur le territoire français. Ces méthodes permettent de diminuer le temps de vieillissement (ou maturation) ultérieur puisqu'une grande partie de l'hydratation de la chaux vive a déjà eu lieu lors du refroidissement.

Les mesures d'expansion volumique réalisées avec ou sans cette technique démontrent sans ambiguïté l'efficacité de ces mesures dans les performances des laitiers en vue de leur utilisation ultérieure.

- **Au niveau du stockage** : l'objectif est dans ce cas de favoriser l'hydratation de la chaux et de la magnésie libres au cours du stockage, afin de minimiser les risques de gonflement après mise en œuvre au sein des ouvrages.

Lorsque le laitier de convertisseur à oxygène est refroidi et solidifié, la pratique la plus connue pour éliminer la chaux libre est le vieillissement à l'air ambiant qui favorise l'hydratation et la carbonatation des éléments instables. C'est un des objectifs de l'opération de recherche SESAR (StEel Slag roAd and enviRonment, Caractérisation, modélisation et validation de l'impact sur les eaux souterraines des laitiers sidérurgiques utilisés en construction routière), chargée de vérifier la diminution de la teneur en chaux libre par le vieillissement à l'air des laitiers.

Une autre opération de recherche menée entre le LCPC (Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, maintenant IFSTTAR) et le CTPL (Centre Technique de Promotion des Laitiers sidérurgiques) sur l'hydratation des granulats de laitier de conversion à oxygène, s'est terminée en 2004. Les recherches de Auriol & al. ont permis de montrer que :

- Il était utile de brasser les stocks au cours du vieillissement afin de limiter le croûtage calcaire dû au phénomène de carbonatation de la chaux libre en surface du tas. Cette croûte limite la perméabilité du stock et stoppe donc l'hydratation des matériaux situés au cœur par pénétration des eaux météoriques.
- La désactivation de la chaux au niveau d'un stock est un phénomène lent du fait des processus physico-chimiques décrits ci-dessus.

Par conséquent, lorsqu'aucune mesure n'est mise en œuvre au moment de la génération du laitier au niveau des installations sidérurgiques (cf. paragraphe précédent), les techniques les plus récentes de vieillissement artificiel des laitiers d'aciérie de conversion qui sont pratiquées visent à accélérer la cinétique d'hydratation de la chaux et magnésie libres.

Pour ce faire, le matériau soumis au vieillissement – à l'air (carbonatation par le CO₂) et/ou à l'eau (hydratation) – peut être⁹ :

- régulièrement arrosé et/ou retourné (process en cours de mise en oeuvre sur le site ArcelorMittal de Fos-sur-Mer),
- stocké en couches « minces » (épaisseur < 1m), associé à un arrosage régulier et à un brassage (durée du processus : quelques mois) . C'est le procédé ACERITA (Brésil, Da Silveira & al. 2005)

Toutes ces méthodes présentent toutefois un inconvénient majeur : les traitements sur laitiers refroidis sont relativement longs, manquent de souplesse (notamment pour le concassage qui limite les débouchés) et ne sont pas toujours fiables. Par ailleurs, ils nécessitent des surfaces d'épandage pas toujours disponibles sur certains sites.

- **Au niveau de l'élaboration des produits finis** : la préparation des fractions granulométriques fines permettant de fabriquer des granulats¹⁰ par criblage et/ou concassage des laitiers bruts (tout-venant), mais aussi les techniques de formulations des matériaux routiers utilisés pour la construction des chaussées (GNT, GTLH, GB/EME ou BB/BBME) peuvent également permettre d'envisager une maîtrise de l'expansion volumique intrinsèque des granulats de laitiers d'aciérie de conversion.

Plusieurs projets de recherche entre le LCPC et le CTPL ont ainsi permis de démontrer la possibilité de fabriquer des mélanges 100% laitiers LD avec une granulométrie (fuseau étroit) permettant de limiter les gonflements.

D'autres études ont également mis en évidence la possibilité de réaliser des mélanges stables associant des laitiers de conversion et des matériaux inertes.

⁹ L'étuvage sous bâche n'est pratiqué qu'au Japon

¹⁰ Au sens des normes produits relatives aux granulats, cf. tableau 1

Ces techniques prennent en compte l'agencement des particules au sein de l'édifice constituant la structure granulaire de l'ouvrage et la porosité disponible permettant l'absorption de l'expansion sans dommage pour l'ouvrage.

5.3.3. Prise en compte de l'expansion volumique dans la prescription de l'usage des laitiers sidérurgiques

Les valeurs obtenues lors de la mesure du taux d'expansion volumique (%) permettent le classement du laitier en vue d'une utilisation en technique routière. Les normes produits (NF EN 13242¹¹, NF EN 13043¹², ...) définissent des classes avec des valeurs seuils d'expansion de 3,5 % (classe V3,5), 5% (classe V5), 7,5% (classe V7,5), et 10 % (classe V10 si inférieure, ou $V_{déclarée}$ si supérieure).

Ces indications, mesurées sur les granulats de laitiers, permettent de vérifier que les performances des matériaux seront adaptées aux usages finaux, et que moyennant le respect de ces exigences, il n'y aura pas de désordres pour les ouvrages construits. Dans ce cadre, il est utile de rappeler que le potentiel d'expansion d'un grain de laitier est inversement proportionnel à la taille du granulat¹³.

A ce jour, et compte tenu des retours d'expériences dont on dispose pour l'utilisation des laitiers d'aciérie, le respect de ces exigences n'a pas conduit à des désordres au sein des ouvrages, démontrant bien la sécurité des valeurs limites retenues par les normes. Par ailleurs, certains emplois (en béton bitumineux par exemple) imperméabilisent les granulats et permettent d'éviter l'hydratation de la chaux.

6. Caractéristiques environnementales

6.1. Acceptabilité environnementale

Le SETRA a édité en octobre 2012 le Guide « Acceptabilité environnementale de matériaux alternatifs en technique routière – les laitiers sidérurgiques ». Ce guide d'application constitue la déclinaison opérationnelle, pour les laitiers sidérurgiques, de la démarche d'évaluation du guide méthodologique « *Acceptabilité de matériaux alternatifs en technique routière – Evaluation environnementale* » (SETRA, mars 2011).

Ainsi, pour l'utilisation en technique routière de matériaux alternatifs et routiers élaborés à partir de laitiers sidérurgiques, il n'est pas utile de se référer à la démarche d'évaluation générale du guide méthodologique cité ci-avant ; les seules prescriptions et exigences du guide d'application, adaptées aux caractéristiques des principaux gisements de laitiers sidérurgiques rencontrés sur le territoire, sont suffisantes.

Ce guide est issu d'un travail conjoint entre les producteurs, les entreprises, le RST (Réseau Scientifique et Technique) et les Administrations centrales du MEDDE.

¹¹ Granulats pour matériaux traités aux liants hydrauliques et matériaux non traités utilisés pour les travaux de génie civil et pour la construction des chaussées, mars 2008

¹² Granulats pour mélanges hydrocarbonés et pour enduits superficiels utilisés dans la construction des chaussées, aérodromes et d'autres zones de circulation, août 2003

¹³ Etude LCPC/CTPL - 2005 Erwann RAYSSAC, Vincent LEDEE (TGCE/SGr) et François DE LARRARD (TGCE)

Il rappelle un grand nombre de définition, les domaines d'emploi des laitiers sidérurgiques et par extension des laitiers d'aciérie en technique routière avec les limitations d'usage en vigueur.

Transfert vers l'eau

Le guide d'acceptabilité environnementale des laitiers sidérurgiques en technique routière prend en considération le transfert et l'impact sur la ressource en eau. Le potentiel de relargage des laitiers sidérurgiques est mesuré conformément à la norme NF EN 12457-4. L'évaluation du comportement à la lixiviation de ces matériaux alternatifs se traduit ensuite en fonction de l'usage en technique routière.

Le tableau 3, fourni par le Guide d'acceptabilité environnementale de matériaux alternatifs en technique routière des laitiers sidérurgiques (octobre 2012), présente les valeurs limites correspondant à des quantités maximales relarguées autorisées, pour un ratio liquide/solide L/S = 10 l/kg, telles que calculées selon les exigences fournies dans la norme NF EN 12457-4, et exprimées en mg/kg de matière sèche.

Les mesures du pH et de la conductivité électrique sont obligatoires tel que spécifié dans les chapitres 5.2 et 7.2 de la norme NF EN 12457-4 et doivent être reportées dans les bordereaux des résultats obtenus.

Paramètre	Valeur limite (mg/kg de matière sèche)		
	Type 1	Type 2	Type 3
As	0,6	0,6	0,6
Ba	36	25	25
Cd	0,05	0,05	0,05
Cr total	4	2	0,6
Cr hexavalent	1,2	0,6	-
Cu	3	3	3
Hg	0,01	0,01	0,01
Mo	5,6	2,8	0,6
Ni	0,5	0,5	0,5
Pb	0,6	0,6	0,6
Sb	0,08	0,08	0,08
Se	0,5	0,4	0,1
Zn	5	5	5
Fluorures	60	30	13
Chlorures	10000	5000	1000
Sulfates	10000	5000	1300

Tableau 3 : Valeurs limites à respecter par les laitiers sidérurgiques en fonction des différents usages routiers (Sources : guide SETRA, octobre 2012)

Compte tenu des valeurs de lixiviation obtenues sur les laitiers sidérurgiques, le guide propose une acceptation pour leur utilisation en fonction de trois familles d'usages routiers :

- Les usages routiers de type 1, dits « revêtus » par une structure réalisée à l'aide d'asphalte, d'enrobés bitumineux, d'enduits superficiels d'usure, de béton de ciment ou de pavés jointoyés par un matériau lié.
- Les usages routiers de type 2, dits « recouverts » par au moins 30 cm de matériaux naturels ou équivalents.
- Les usages routiers de type 3, dits « non recouverts » et « non revêtus »

Plus l'usage est sensible (usages 1 → usages 3), plus les valeurs limites à respecter sont sévères (cf. tableau 3).

6.2. Suivi environnemental

Malgré la réalisation de différents ouvrages instrumentés au cours des dix dernières années, il n'existe pas de publication ni données fiables utilisables.

7. Aspects sanitaires

Dans la perspective d'une future sortie du statut de déchets des LAC, la majorité des producteurs de laitiers sidérurgiques français ont procédé dès 2010 à l'enregistrement des laitiers dans le cadre du Règlement REACH (2006/1907/CE), afin de s'assurer des caractéristiques des substances et de la maîtrise des risques liés à leurs usages.

Cela a donné lieu à de nombreuses études, tant au niveau de la chimie des laitiers que de leurs effets sur la santé humaine et l'environnement.

Des recherches dans la littérature ont été faites et de nombreux tests in vitro et in vivo réalisés tels que, concernant la toxicité : irritation de la peau et des yeux, sensibilité de la peau, mutation génétique chez les bactéries, cytogénécité chez les mammifères, inhalation, etc.

A ce jour, et sur la base des résultats disponibles issus du Consortium industriel pour l'enregistrement des laitiers dans le cadre de REACH (REACH Ferrous Slag Consortium – RFSC), toutes ces études supportent la conclusion que les laitiers sidérurgiques ne présentent pas de risques sanitaires pour les usages en techniques routières.

8. Usages (Types d'infrastructures)

8.1. Emplois (routiers) répertoriés en France

La norme française NF P 18-545 (qui se réfère aux normes européennes) définit les caractéristiques intrinsèques, géométriques et mécaniques auxquelles doivent répondre les granulats pour leur utilisation en technique routière.

Les critères environnementaux définis dans le Guide d'Acceptabilité environnementale des laitiers sidérurgiques en technique routière d'octobre 2012 définissent les usages en technique routière des laitiers sidérurgiques et donc, par conséquent pour les laitiers d'aciérie (LAC et LAFE).

Ceux-ci peuvent être limités par certains critères relatifs à l'expansion volumique, en particulier pour certains laitiers de convertisseur riches en chaux et magnésie libres : des dégradations dues à l'utilisation de certains laitiers d'aciérie de conversion ont pu être observées comme par exemple :

- Bosses en champignon, bossage transversal, soulèvements plus ou moins étendus avec fissuration, ondulations du revêtement hydrocarboné,
- Soulèvements et fissurations de dalles, bombements des revêtements en béton de ciment,
- Désagrégation du béton maigre lorsque les laitiers sont directement utilisés comme granulats.

Cependant, au cours de ces dix dernières années la professionnalisation de la filière et la mise en place de plans d'assurance qualité permettant de s'assurer des performances géotechniques des laitiers ont permis de limiter ces dégradations.

La norme française NF P 18-545 se réfère aux normes européennes (NF EN 13043 et NF EN 13242) pour proposer des catégories de seuils pour l'expansion volumique à respecter pour l'utilisation des granulats de laitiers selon la technique retenue :

- Granulats issus de laitiers pour enrobés (NF EN 13043) : $V_{ss} = 3.5\%$
- Granulats issus de laitiers pour GTLH ou GNT (NF EN 13242) : $V_{ss} = 5\%$

La norme précise également qu'en l'état actuel des connaissances, l'utilisation des granulats de laitiers d'aciérie (de conversion) dans les mélanges traités aux liants hydrauliques n'est pas recommandée du fait de la rigidité de la matrice.

Les domaines d'utilisation des laitiers de convertisseur à oxygène, connus et éprouvés à ce jour, sont les domaines où les exigences de stabilité volumique du matériau ne sont pas essentielles. L'utilisation se limite essentiellement à des applications sous forme de GNT, à des remblais généraux (NF P 11-300), matériaux drainants, assainissement, pieux ballastés, renforcement de berges etc.

Les couches de roulement en granulats enrobés dans des liants bitumineux ont été employées avec succès sur des voies à forte traficabilité et avec des charges à l'essieu conséquentes (routes de sites sidérurgiques en particulier) et ont démontré, à ce jour, un bon comportement (peu de faïençage ou d'orniérage). Toutefois cet usage ne s'est pas développé du fait d'une consommation souvent importante de liant rendant cette solution peu compétitive.

Toutes filières confondues, le laitier d'aciérie est valorisé comme matériau de viabilité dans les techniques de génie civil comme remblai, protection de berges. De plus, leur masse volumique plus importante que celle d'un granulats naturel permet une utilisation en masque ou éperons drainants, ou encore pour les remblais de préchargement.

En ce qui concerne les laitiers d'aciérie électrique, ils sont bien plus largement utilisés dans le domaine routier, pour la réalisation de couches de forme, d'assises de chaussées (couches de base et de fondation), mais aussi pour la réalisation de couches de surface ou d'enduits superficiels où leur excellent coefficient de polissage accéléré (PSV) en font des matériaux particulièrement recherchés, surtout dans les régions dépourvues de ce type de matériaux routiers (Lorraine).

8.2. Emplois routiers liés à l'acceptabilité environnementale

Les domaines d'emploi préconisés dans le Guide d'Acceptabilité environnementale des laitiers sidérurgiques en technique routière d'octobre 2012¹⁴, sont résumés comme suit; ce sont les usages fréquents ne nécessitant pas d'étude supplémentaire.

- *Type 1* : Au plus 3 mètres de hauteur en sous couche de chaussée ou accotement **revêtus**
- *Type 2* : Au plus 6 mètres de hauteur en remblais technique connexe à l'infrastructure routière ou en accotement **recouverts**, ou compris entre 3 et 6 mètres de hauteur en sous couches de chaussée ou d'accotement **revêtus**.
- *Type 3* : Pas de restriction de hauteur de mise en œuvre. Les usages routiers définis dans le guide sont plus nombreux (et plus sensibles) que pour les types 1 et 2 mais les critères environnementaux requis sont plus sévères.

Le tableau suivant présente quelques exemples d'utilisation selon le type (1, 2 ou 3) :

Type 1	Type 2	Type 3
Remblai sous ouvrage	Remblai de plate forme végétalisée	Remblai technique (phonique, paysagé) non recouvert
Couche de forme	Remblai en zone revêtue	Accotement non revêtu
Couche de fondation	Merlon phonique ou paysagé	Couche de roulement (enduits superficiels et enrobés bitumineux)
Couche de base et couche de liaison	Remblai de tranchée	Piste cyclable non revêtue
	Remblai	Allée piétonne non revêtue
		Remblai et assise de parking non recouverts
		Piste d'accès de chantier non recouvert
		Route forestière et chemin d'exploitation agricole

Tableau 4 : Exemples d'usages autorisés selon le guide SETRA pour les laitiers

Toute autre utilisation devra faire l'objet d'une étude complète en conformité avec la méthodologie du SETRA (mars 2011), et soumise à la DREAL.

9. Références bibliographiques

9.1. Publications

E Matei, C Predescu, M Sohaciu, A Berbecaru - Method for Assessment of Potentially Pollution of Slag from Iron and Steel Industry, Material Science and Engineering Faculty University POLITEHNICA of Bucharest 313, Splaiul Independentei, Hall JF 002, Bucharest ROMANIA ecomet@ecomet.

Reuter, M., Xiao, Y., and Boin, U. Recycling and environmental issues of metallurgical slags and salt fluxes. VII International Conference on Molten

¹⁴ Cf. aussi § 6.1.

- Slags Fluxes and Salts, The South African Institute of Mining and Metallurgy, 2004.
M. Reuter, Y. Xiao, and U. Boin Recycling and environmental issues of metallurgical slags and salt fluxes Delft University of Technology, Department of Applied Earth Science, Delft, Netherlands
- Auriol JC, Rayssac E, Platret G, Deneele D, De Larrad F, Ledee V, 2006 « Valorisation des laitiers d'aciérie LD pour les infrastructures routières », Séminaire de clôture opération LCPC-CTPL
- Barbier A, 2001 « Les laitiers sidérurgiques en technique routière, Cas particulier des laitiers de convertisseur à oxygène », Rapport Master ENSEM Nancy, LRPC Nancy
- Dao P LAM, 2010 « Valorisation d'un laitier LWS en techniques routières », Thèse de doctorat de l'université Henri Poincaré Nancy
- Alexandre J, Boudonnet J.Y., 1993. « Les laitiers d'aciérie LD et leurs utilisations routières. Laitiers sidérurgiques, CTPL n°75, pp.57-62.
- Beranger J, Henry G, Sanz G, 1994. « Le livre de l'acier. » Lavoisier, Paris, 1491 pages.
- Boudonnet J.Y., 1994. « Les laitiers d'aciérie LD. La caractérisation chimique : une étape indispensable. Panorama des connaissances. » Laitiers sidérurgiques CTPL n°76, pp 27-43.
- Boudonnet J.Y., 1996. « L'essai européen d'expansion à la vapeur. Evaluation de la stabilité volumique des laitiers d'aciérie. » Laitiers sidérurgiques CTPL n°79, pp15-24.
- Fallman A.-M. Hartlen J, 1994. "Leaching of slags and ashes – controlling factors in field experiments versus in laboratory tests, Environmental aspects of construction with waste materials." (Ed.) Goumans J.J.J.M., van der Sloot H.A., Aalbers Th.G, Elsevier Science B.V., pp. 39-54.
- Hornain H., Rafai H., Thuret B., 1995. « Contribution à la détermination de la chaux libre dans les laitiers LD : problèmes rencontrés, principales conclusions. » Laitiers sidérurgiques, CTPL n°78, pp30-40.
- Sylvestre P., Crosnier J., 2003. « Tenue au gel d'une grave de laitier d'aciérie. » Laitiers sidérurgiques, CTPL n°84; pp.6-13.
- Lind B.B., Fallman A.-M., Larsson L.B., 2001. "Environmental impact of ferrochrome slag in road construction." Waste Management, Vol. 21, pp. 255-264.
- MINISTERE DE L'AMENAGEMENT DU TERRITOIRE ET DE L'ENVIRONNEMENT (MATE), 1998. « Critères et méthodes d'évaluation de l'écotoxicité des déchets. » Janvier 1998.
- Panis A., 1976. « Les scories LD. » Bulletin de liaison des laboratoires des Ponts et Chaussées n°83, mai-juin 1976, pp.99-104.
- Prin-Ferreira L., 2000. « Étude du comportement hydraulique d'une gehlénite synthétique et de l'élimination d'inclusions de chaux, en vue de la valorisation de deux sous-produits

de la sidérurgie : les laitiers cristallisés et les scories issues du procédé Linz-Donawitz. »
Thèse de doctorat, Nancy I.

Renac L., Aubert F., Gaudillere J., 2001. « Saône-et-Loire : des couches de forme en laitier d'aciérie. » Laitiers sidérurgiques CTPL n°81, pp.6-10.

9.2. Documents techniques

Boéro. E, 2000. « RN 61 - Déviation de Sarreguemines – Glissement de terrain entre PR 6275 et PR 6500. » L.R.P.C., Dossier 0067019.

Bruncher P., 2001.. « Pour rendre vos enrobés plus accrocheurs : un nouveau granulat, les laitiers électriques de Gandrange. » Société Lorraine d'Agrégats (S.L.A.G) Document technique de synthèse.

Didot J.C, 2000. « Schéma Départemental des Carrières de la Meurthe-et-Moselle. » LRPC Nancy S.D.C de 54.

Didot J.M., 2000. « Ressources en granulats pour les usages routiers Région Lorraine. » L.R.P.C. de Nancy, 31 pages.

Godmel C., 2004. « Réalisation d'une chaussée en zone artisanale à Gandrange (Moselle) avec une grave non traitée 0/31.5 de laitiers d'aciérie électrique. » Dossier L.R.P.C. Nancy.

IRH Environnement (Institut de Recherche Hydrologique), 1997. Dossier n° 97 LA 02. Nancy.

LECES Environnement, 2001. Chapitre « Résultats d'analyses » publié par la société Eurogranulats. Metz, dossier n° 98 C 15.

LRPC Nancy, 1996. « Cogesud; essai de gonflement sur le laitier électrique Granulac. » Dossier 96/1109.

PREDIS Nord Pas de Calais (Plan Régional d'élimination des déchets industriels spéciaux), 2002: « Améliorer la valorisation des déchets industriels en BTP » Groupe de travail n°5, Guides Techniques régionaux. Septembre 2002.

SETRA- LCPC, 2000. « Guide technique pour la réalisation des remblais et des couches de forme. » (GTR) Guide Technique D 9233, juillet 2000, 2^{ème} édition, 99p.

Todaro P., 1992. « Valorisation des laitiers d'aciéries électriques. En technique routière. Procédé Eurogranulats. » Brevet français et européen n°0539287.

Perrine Chaurand, 2006 (réalisée sur les LAC de Arcelormittal de Fos/Mer) Apport de la cristallographie et de la spéciation du chrome et du vanadium à la modélisation de l'altération de granulats artificiels (sous-produits d'aciérie)

10. Auteurs et relecteurs

Auteurs OFRIR1	Chantal Godmel (LRPC Nancy)
Relecture d'experts OFRIR1	Jean-Claude Auriol (LCPC), Yves Brosseau (LCPC), François de Larrard (LCPC), Jérémie Domas (INERIS), Guillaume Gay (INERIS), Agnès Jullien (LCPC), Vincent Lédée (LCPC), Michel Legret (LCPC)
Relecture comité de pilotage	Laurent Château (ADEME), Pierre Dupont (SETRA), Frédéric Leray (Ministère de l'environnement), Jacques Pérême (CTPL), Jacques Vecoven ((UNPG)
Auteurs OFRIR2	Cécile Pestelard (LRPC Nancy)
Relecture d'experts OFRIR2	Céline Chouteau (CETE NP), Guillaume Gay (INERIS), Agnès Jullien (IFSTTAR), Samyr El Bedoui (LRPC Nancy), Jacques Reynard (CTPL), Jérémie Domas (CTPL)
Relecture bureau	Agnès Jullien, Laurent Château
Date de mise en ligne, version finale	janvier 2014