

2024

Les dossiers du géotechnicien

GESTION DES DECHETS

Sous-produits d'aciérie

(version du 15 février 2024)



Janssens Benoît

Table des matières

1. GENERALITES.....	3
1.1 IDENTIFICATION	3
1.1.1 Définition d'une aciérie.....	3
1.1.2 Processus général de fabrication	3
1.1.3 Traitement des sous-produits industriels	8
1.2 CONTEXTES	9
1.2.1 Contexte historique	9
1.2.2 Contexte économique.....	10
1.2.3 Contexte juridique	10
1.2.4 Contexte environnemental	11
2. LAITIERS DE HAUT-FOURNEAU	14
2.1 GENERALITES	14
2.1.1 Définition	14
2.1.2 Classification	14
2.2 CARACTERISATION	14
2.2.1 Aspect visuel	14
2.2.2 Compositions minéralogique et chimique.....	14
2.2.3 Caractéristiques environnementales	16
2.2.4 Caractéristiques géotechniques	16
2.3 VALORISATION MATIERE.....	17
2.3.1 Laitier de haut-fourneau cristallisé	18
2.3.2 Laitier de haut-fourneau vitrifié.....	19
3. SCORIES D'ACIERIE OU LAITIERS D'ACIERIE	25
3.1 GENERALITES	25
3.1.1 Définition	25
3.1.2 Classification	25
3.2 CARACTERISATION	25
3.2.1 Aspect visuel	25
3.2.2 Composition chimique.....	25
3.2.3 Caractéristiques environnementales	26
3.2.4 Caractéristiques géotechniques	27
3.3 VALORISATION MATIERE.....	32
3.3.1 Scories classiques (<i>LD, LDA et BOF</i>) et électriques (<i>EAF</i>).....	32
3.3.2 Scories inox	37
3.3.3 Autres types de scories et déchets d'aciérie	40
4. BIBLIOGRAPHIE.....	47

REMARQUE IMPORTANTE : Comme son nom l'indique, la série "Les dossiers du géotechnicien" s'adresse principalement aux géotechniciens et aux autres professions liées de près ou de loin à la géotechnique. De ce fait, chaque ouvrage ne reprend que les sujets intéressants d'un point de vue géotechnique.

REMERCIEMENTS POUR AVIS

- Peut-être vous bientôt.



NOTICE : Ce dossier a comme objectif d'être un ouvrage interactif d'informations. Ainsi, si vous souhaitez y ajouter des informations complémentaires, des remarques ou des commentaires, n'hésitez pas à me les communiquer, via l'adresse e-mail (jbconseils2020@gmail.com) ou via le site internet (<https://jbconseils.be>). Je me ferai un plaisir de les introduire dans une version actualisée du dossier ; d'où l'importance de vérifier la date du document que vous lisez par rapport à la version présente sur le site.

En effet, vous trouverez la dernière version ainsi que d'autres dossiers abordant d'autres thématiques à la rubrique Divers/Dossiers du géotechnicien.

Je vous remercie d'avance pour votre coopération.

Benoît JANSSENS

Conseiller géotechnicien indépendant

1. GENERALITES

REMARQUE : Pour bien valoriser un sous-produit industriel, il est important de connaître ses processus de fabrication et de traitement ainsi que les différents contextes du matériau (*histoire, économie, environnement, réglementations et géotechnique*).

1.1 IDENTIFICATION

1.1.1 Définition d'une aciérie

L'*aciérie* produit de l'acier sous la forme de produits semi-finis à partir de minerais ou de vieilles ferrailles en utilisant des processus thermiques.

1.1.2 Processus général de fabrication

Plusieurs étapes permettent de passer d'un minerai ou d'un déchet métallique à une pièce élaborée :

- La *métallurgie primaire* transforme la matière initiale en un acier plus ou moins élaboré. Deux filières existent :
 - La *filière fonte* ou *filière classique* produit l'acier à partir d'un minerai de fer, via un haut-fourneau et un convertisseur ;
 - La *filière carbone* ou *filière électrique* produit l'acier à partir de ferrailles recyclées, via un four électrique.
- La *métallurgie secondaire* ou *métallurgie de poche* fournit à l'acier liquide, sa nuance ;
- La *coulée* donne la forme solide finale de l'acier. La fonderie s'inscrit également dans cette phase, bien qu'elle concerne une diversité plus importante de matières (*métaux, alliages*).

L'acier peut également subir différents traitements spécifiques, comme notamment un traitement le rendant inoxydable.

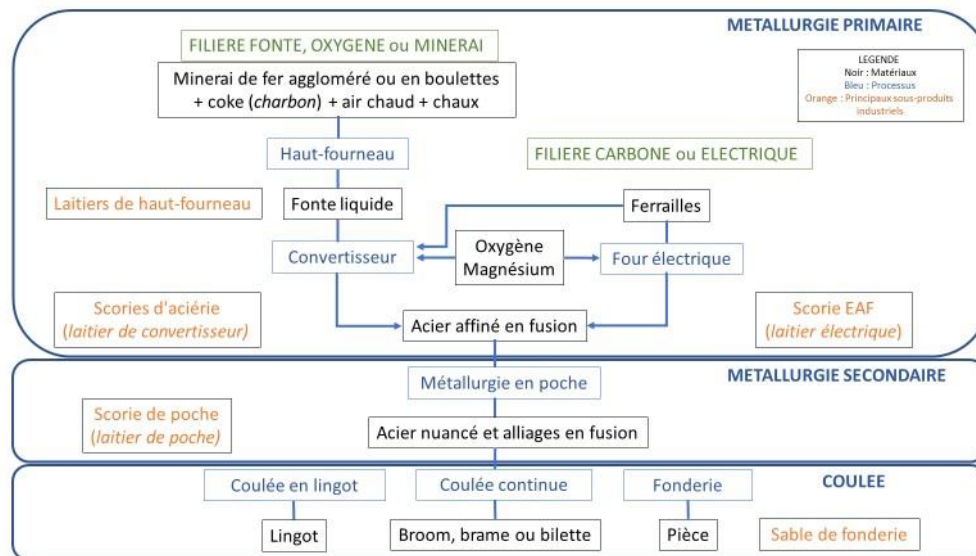


Figure 1.1 : Processus général de fabrication de l'acier (source : internet).

1.1.2.1 Métallurgie primaire

a. Filière fonte, oxygène ou minerai

La filière fonte produit l'acier à partir d'un minerai de fer, de charbon (sous forme de coke), de chaux et d'oxygène. Elle nécessite deux opérations distinctes qui génèrent des sous-produits industriels distincts.

a.1 Fusion du minerai brut dans un haut-fourneau

Le minerai de fer riche en oxydes (jusqu'à 60% d'hématite : Fe_2O_3) et préparé sous forme de boulettes ou d'agglomérés est fondu dans un haut-fourneau en présence de *coke* (combustible composé de carbone quasi pure), d'air chaud injecté et de fondants comme la chaux (favorise l'agglomération d'impuretés) et un peu de magnésie.

Le haut-fourneau est un four vertical au sommet duquel les différents matériaux sont introduits, via le *gueulard*, par couches alternées. La température du haut-fourneau peut atteindre 2 000°C.

Le coke, en brûlant au contact de l'air chaud (1 300 – 1 400°C) injecté en partie inférieure du four, via des tuyères, se transforme en monoxyde de carbone qui entraîne la fusion du minerai, réduit les oxydes de fer (*capture de l'oxygène*) et isole le fer selon la réaction :



La fusion du mélange se traduit par la séparation de deux produits de densité différente :

- La **fonte** riche en fer impur et en carbone est présente dans le bas du haut-fourneau en raison de sa densité élevée ($\pm 6,8$). C'est le liquide de base de tout acier ;
- Le **laitier de haut-fourneau** comporte la majorité des résidus du minerai (*oxydes, chaux, alumine, constituants non métalliques et non gazeux, gangue, etc.*), les cendres de coke et les additifs minéraux. Il est présent au sommet du haut-fourneau en raison de sa plus faible densité (± 3). La température du laitier, de l'ordre de 1 450 à 1 500°C est légèrement supérieure à celle de la fonte. Il est évacué du haut-fourneau pour être refroidi.

REMARQUE : Le nom du laitier provient du fait que ce liquide a une couleur similaire à celle du lait.

Une tonne de fonte génère entre 250 et 300 kg de laitier de haut-fourneau, voire 750 kg (*minerai lorrain riche en phosphore*).

Ce processus peut faire l'objet de différentes adaptations dont :

- L'ajout d'**oxydes spécifiques** comme d'oxydes de manganèse (*filière ferro-manganèse*) permet d'obtenir un acier particulier. Il donne lieu à des sous-produits industriels spécifiques produits en très faible quantité ;
- La **teneur en chaux** (*fondant*) dépend de la composition et de l'origine du minerai. Le minerai européen (*Allemagne, France, Suède, ...*), souvent plus riche en phosphore et manganèse (*technique phosphore ou technique Thomas T*) nécessite une plus grande teneur en chaux que le minerai hors Europe (*Australie et Brésil*) plus riche en oxydes de fer (*technique hématite*) ;
- La **composition du laitier** (*qui est un sous-produit industriel*) peut être modifiée durant le processus de fonte, notamment par l'incorporation d'aluminates. Cela permet d'améliorer la qualité du laitier vitrifié utilisé abondamment en cimenterie.

a.2 **Refroidissement du laitier de haut-fourneau**

Si la fonte coule vers le convertisseur ou un wagon-poche chargé l'amener au convertisseur pour continuer son épuration, le laitier de haut-fourneau est quant à lui refroidi afin d'obtenir un matériau solide. Deux techniques de refroidissement existent et conditionnent ses propriétés finales :

- Le **refroidissement lent à l'air** permet l'arrangement des éléments au sein d'une structure cristalline. Cela génère un **laitier cristallisé** qui se caractérise par la présence de minéraux de petite taille et d'une roche dure artificielle et chimiquement stable. Deux modes d'évacuation donnent lieu à des laitiers différents :
 - **Le laitier de fosse ou de crassier** est versé dans une poche mobile (*wagon ou remorque*) pour être déversé dans une fosse en couche mince sur le laitier déjà refroidi. Cela permet d'avoir également une grande surface d'échange avec l'air. Dans certains cas, un léger arrosage si possible avec de l'eau de mer (*riche en sels*) est réalisé. En cours de refroidissement, une aspersion plus importante d'eau permet de provoquer une fragmentation en blocs grossiers ($\varnothing > 300 \text{ mm}$) appelé **laitier cristallisé brut**. Ce laitier est compact, dense et possède des caractéristiques mécaniques élevées ;

REMARQUE : Par le passé, le laitier chaud était versé à l'écart du site sidérurgique par manque de place à proximité du lieu de production ou de débouchés. Ce site est appelé **crassier**.

- **Le laitier de "slag-pit"** est versé en continu à proximité du haut-fourneau, via un dispositif de rigoles, dans une fosse où chaque coulée se présente sous forme d'une couche épaisse recouverte d'un laitier craquelé et solidifié qui pousse les précédentes (*encore en cours de refroidissement*). Le front de solidification progresse très lentement en piégeant à l'interface liquide – solide, le gaz SO₂ né de l'oxydation à l'air du soufre du laitier. Le matériau cristallisé est plus poreux, moins dense et possède de moins bonnes caractéristiques mécaniques.

- Le *refroidissement quasi instantané sous eau* à haute pression (*granulateur*) et accompagné éventuellement d'air (*bouletage*), fige les éléments sur place et forme une structure vitreuse. Cela donne un *laitier vitrifié* sous forme de sable possédant des propriétés hydrauliques similaires à celles du ciment. Deux techniques de refroidissement existent selon l'emploi d'air ou pas :
 - La *granulation* ne fait intervenir que l'eau. Il donne lieu au *laitier (vitrifié) granulé* ;
 - Le *bouletage* fait intervenir simultanément l'eau et l'air comprimé et donne lieu au *laitier (vitrifié) bouleté*.

Le laitier vitrifié peut être séché et finement broyé pour donner le *laitier moulu* qui dispose de bonnes propriétés hydrauliques.

a.3 Désulfuration de la fonte

Avant de transférer la fonte vers l'aciérie dans un wagon particulier, des carbures de calcium sont injectés dans la fonte afin de produire des sulfures de calcium qui se concentrent dans une *scorie de désulfuration*.

a.4 Affinage de l'acier en convertisseur

La fonte contient une certaine teneur en carbone et impuretés qui doivent être éliminés. Cette opération dite d'affinage se produit dans un *convertisseur*.

La fonte (1 300°C) ainsi qu'une certaine quantité de chaux calcique (*extraction du phosphore*) et de dolomie (*amélioration de la scorification et prolongement des revêtements réfractaires du convertisseur*) sont versées sur un lit de ferraille dans le convertisseur. Les réactions exothermiques provoquent une augmentation de la température (1 500 - 1 600°C). La cuve est fermée et une injection d'oxygène pur à haute pression (10 bars) provoque une explosion violente au cours de laquelle le carbone se combine à l'oxygène pour former un élément qui absorbe la silice et le phosphore. D'autres éléments indésirables sont brûlés.

Le processus génère deux matériaux qui se séparent lors de la vidange du convertisseur :

- L'*acier sauvage* liquide est versé dans une cuve de poche et envoyé vers le site de métallurgie secondaire. Sa densité est de l'ordre de 7,8 ;
- La *scorie d'aciérie* (terme belge) ou *laitier d'aciérie* ou *de convertisseur* (termes français - LAC) est un liquide foncé contenant les impuretés présents dans la fonte, la chaux, la magnésie et de nombreuses inclusions d'oxydes dissoutes. Sa densité est de l'ordre de 3.

Une tonne d'acier génère entre 80 et 150 kg de scorie d'aciérie.

Les différents procédés utilisés génèrent des scories ferreuses de compositions et caractéristiques légèrement différentes :

- Le *procédé BOF* (*Basic Oxygen Furnace*) est le procédé classique développé pour un minerai hématite. Il fournit la *scorie BOF* ;
- Le *procédé LD* (*Lintz – Donawitz*) est une variante du procédé BOF où l'injection d'oxygène a lieu par le haut. La *scorie LD* est difficilement broyable. Le nom fait référence à la région où été développé ce processus ;
- Le *procédé LDA* (*Lintz – Donawitz Amélioré*) est une variante améliorée du procédé LD ;
- Le *procédé LDAC* (*Lintz – Donawitz Amélioré Charleroi*) est une variante du procédé LDA mise au point à Charleroi pour mieux réguler le flux d'oxygène. Le soufflage a lieu par le haut et le bas ;
- Le *procédé LWS* (*Loire-Wendel-Sprunck*) comprend le soufflage d'oxygène par le bas ;
- Le *procédé OBM* (*Oxygen Blown Maxhuette*) est un processus où le soufflage se réalise par le bas ;
- Le *procédé mixte* concerne toute autre solution ;
- Le *procédé Thomas* est un ancien processus (*avant 1980*) lié à l'emploi d'un minerai phosphoreux (Lorraine) qui générerait une scorie phosphoreuse utilisée principalement en amendement agricole.

Certains aciers nécessitent un traitement spécifique tels que l'ajout d'éléments qui se retrouvent dans la scorie. Ainsi, le chrome ajouté pour inoxyder certains aciers, se retrouve dans la *scorie inox* ou *ALZ* (*voir chapitre spécifique*).

b. Filière électrique (filière carbone ou EAF)

La filière électrique développée dès les années 1990 ou *procédé EAF* consiste à fondre des ferrailles dans un four électrique (1 500 – 1 600°C) par rayonnement d'arcs électriques créés entre des électrodes de graphite alimentées en courant alternatif et situées juste au-dessus de la charge. Lors de la fusion, des additifs comme l'oxygène et la chaux dolomitique sont ajoutés au bain liquide pour provoquer l'oxydation de certains éléments chimiques indésirables dans l'acier (*chrome et silice*) et ainsi favoriser la fusion par dégagement de chaleur lors de ces réactions. Cette technique permet le recyclage des ferrailles.

Le processus génère deux produits :

- L'*acier en fusion* est versé en poche pour être transféré vers la métallurgie secondaire ;
- La *scorie EAF* (*terme belge*) ou *laitier d'aciérie de four électrique* (*terme français*) contient un mélange d'impuretés issus des ferrailles dont du chrome, de la chaux et du silicium.

Une tonne d'acier produit par le procédé électrique génère entre 90 et 130 kg de scorie, soit une quantité similaire à la filière minéral.

c. Refroidissement des scories

Dans les deux filières, la scorie liquide est évacuée du four et refroidie selon une des trois méthodes suivantes :

- Elle quitte le convertisseur ou le four, via un dispositif de rigoles qui l'amène dans une fosse où elle pousse les coulées précédentes (*encore en cours de refroidissement*). Le front de solidification progresse très lentement en piégeant à l'interface liquide – solide, le gaz SO₂ né de l'oxydation à l'air du soufre. Le matériau cristallisé ou "*scorie de slag-pit*" est plus poreux et moins dense. Ses caractéristiques mécaniques sont moins élevées ;
- Elle est versée dans un *cuvier* (*wagon ou remorque*) pour être déversée dans une zone de refroidissement à l'air libre avec un éventuel jet d'eau. Elle est déposée en fine couche compacte. Le produit durci ou *scorie de fosse* offre par la suite de bonnes caractéristiques mécaniques ;

REMARQUE : Lors du déversement dans le cuvier, des additifs comme du sable siliceux (*Allemagne*) peuvent être introduits afin d'améliorer certaines caractéristiques du matériau pour des applications spécifiques (*agricole, routière...*).

- Elle est versée dans un bassin d'eau (= *refroidissement brutal*). La scorie durcie a un aspect vitrifié.



Figure 1.2 : Déversement de la scorie du cuvier dans le bassin de refroidissement.

1.1.2.2 Métallurgie secondaire ou métallurgie en poche

La métallurgie secondaire consiste à affiner certaines nuances complexes (*qui ne peuvent pas être atteintes par le simple convertisseur*). Cette opération qui se passe dans une poche, nécessite d'augmenter la température d'une trentaine de degrés. Cela se fait, soit par un four électrique de poche, soit par un procédé chimique (*aluminothermie*), soit encore en travaillant à haute température durant tout le procédé.

Outre les éléments pour les alliages, différentes matières (*aluminium, silicium*) et de la chaux sont ajoutés afin de former des oxydes contenant les dernières impuretés de l'acier (*carbone, phosphore, soufre*).

Ces oxydes sont par la suite récupérés séparément, via un dispositif de râteau d'écumage, sous forme de *laitier de poche* ou *laitier blanc*. Il est constitué principalement de silice et de chaux et contient les différentes impuretés. Son indice de basicité (CaO/SiO_2) est voisin de 1,2.

1.1.2.3 Cas particulier de l'acier inoxydable

L'acier inoxydable est généralement fabriqué à partir de ferrailles spécifiques et d'une certaine teneur de chrome (*selon la qualité désirée de l'acier*) et de nickel. Le chrome forme une fine pellicule invisible à la surface qui protège l'acier contre toute attaque externe. Il permet également de ne pas dépasser la température de 1 700°C à laquelle ne résistent pas les réfractaires.

L'élaboration de l'acier inoxydable s'opère en 3 étapes et génère 3 sous-produits différents, notamment en termes de basicité :

- La **fusion dans un four électrique** : Les ferrailles, les ferro-alliages (*ferro-chrome, ferro-nickel, ferro-silicium, ...*) et le chrome sont disposés en couches alternées dans une cuve appelée **panier** avant de passer dans le four électrique où le tout est fondu par un arc électrique (1 680°C) avec injection d'oxygène (*brassage du bain*) et ajout de chaux (*fondant*). La chaux chargée d'impuretés réagit avec la silice pour former un silicate de chaux constituant la **scorie inox** (*terme belge*) ou **laitier dit "de four"**. Ce sous-produit riche en chrome se caractérise par un indice de basicité voisin de 1,2.

REMARQUE : L'**indice de basicité** est le rapport en masse de la teneur en chaux (élément basique) sur la teneur en silice (élément acide).

- La **décarburation** et la **désulfuration** dans une "**cornue AOD**" ou **convertisseur AOD** (Argon Oxygène Decarburation) consistent à éliminer l'excès de carbone (1,5 à 2%) et de soufre encore contenu dans la fonte. La fonte est chargée dans une poche fermée (*cornue AOD*) où un flux oxygène - argon est envoyé par le fond afin d'abaisser la pression partielle du CaO. Une partie du carbone s'oxyde et est éliminée sous forme gazeuse. Le bain liquide est riche en oxygène et malgré l'injection d'argon, une partie du chrome est oxydée. Pour le récupérer, une addition de ferro-silicium et de ferro-alliages en quantité plus faible comme le nickel sont ajoutés en fin de procédé. La silice formée est éliminée grâce à une addition de chaux qui permet d'éliminer également le soufre sous forme de sulfure de calcium. La scorie ainsi formée est dite **scorie AOD**. Elle contient principalement du sulfure de calcium et des silicates. Son indice de basicité est voisin de 1,6. Elle n'est souvent pas valorisée à l'extérieur du site de production ;
- La **métallurgie en poche avant coulée** : Après l'opération de décarburation et de désulfuration, une deuxième injection de chaux peut être réalisée pour poursuivre la désulfuration. La scorie ainsi formée est très basique (*indice de basicité voisin de 1,8*) et contient beaucoup de chrome. Ce matériau est généralement versé dans la poche de coulée et récupéré sous forme de **laitier de poche**.

Ces différents produits sont refroidis par arrosage d'eau.

Une tonne d'acier inox génère la production de 70 kg de laitier de four, 90 kg de laitier d'AOD et 10 kg de laitier de poche.

1.1.2.4 Coulée de grande production

L'acier/alliage une fois à bonne nuance doit être mise en forme. Cela se fait au moyen d'une coulée :

- La **coulée continue** : L'acier liquide est coulé à environ 1 560°C dans une lingotière en cuivre. Au contact des parois, le métal se solidifie instantanément et commence à former une peau solide. L'acier est ensuite tiré par un jeu de rouleaux et d'extracteurs. Il achève sa solidification, grâce essentiellement à des jets d'eau. La qualité du métal dépend des caractéristiques de l'opération (*vitesse de coulée, forme de la machine, intensité du refroidissement*) ;
- La **coulée en lingot** consiste à couler l'acier dans un moule en fonte (*lingotière*). Ce procédé ancien et peu performant permet d'obtenir des alliages spécifiques (*aciers non calmés*) incompatibles avec la coulée en continu. Une fois solide, le lingot est démoulé (*strippage*). Après un réchauffage à 1 200°C, il est écrasé dans un laminage pour être transformé en **brame** (*ébauche de produits plats*) ou en **bloom** (*ébauche de produits longs*).

Certains éléments font l'objet d'un laminage à chaud et à froid en vue d'obtenir des rouleaux d'acier fins plats.

1.1.2.5 Fonderie

La **fonderie** est un ensemble de procédés qui consistent à fabriquer une pièce donnée à partir du coulage d'un métal ou d'un alliage liquide dans un moule qu'on laisse par la suite refroidir. Cette activité se présente sous de très nombreuses formes selon le type de forme (*artisanale ou industrielle*), la nature des matériaux coulés (*métaux ferreux, métaux non ferreux, alliages légers*) et du type de moule (*métal, sable de fonderie, etc.*). Des moules en plâtre ou en terre glaise sont également utilisés à de rares occasions.

REMARQUE : Dans certains cas, le sable peut être utilisé pour réaliser des noyaux (**sable à noyaux**) qui viennent remplir les parties creuses de la pièce finie.

1.1.3 Traitement des sous-produits industriels

Comme décrit ci-dessus, la sidérurgie génère une grande diversité de sous-produits industriels selon le mode de production, la nature des matériaux et le produit final.

1.1.3.1 Liste des sous-produits industriels principalement valorisés en domaine routier

Certains sous-produits industriels sont produites en grande quantité avec une composition relativement stable et peuvent donc être valorisés dans le secteur routier, voire de la construction.

- Le *laitier de haut-fourneau* regroupe le laitier cristallisé (*refroidissement lent*) et le laitier vitrifié (*refroidissement brutal*) ;
- La *scorie d'aciérie classique* issue de la filière minerais comprend principalement les scories LD, LDA, LDAC et BOF ;
- La *scorie d'aciérie électrique* issue de la filière électrique est caractérisée par la scorie EAF ;
- La *scorie inox* est issue du processus pour former de l'acier inoxydable ;
- Les *scories non ferreuses* contiennent des scories de cuivre, nickel, phosphore, plomb et zinc ;
- Le *laitier de poche* ou *laitier blanc* est issu de la métallurgie secondaire ;

1.1.3.2 Récupération des métaux à partir des scories

Le projet européen CHROMIC a étudié les techniques souvent onéreuses et énergivores pour récupérer les métaux dont notamment le chrome, dans les scories (*Bru : 2019*).

Ces méthodes comportent un broyage fin, une lixiviation sélective (*micro-onde, ondes radio ou ultra-son*) et une récupération sélective (*précipitation sélective, absorption, extraction par solvant et électrocoagulation*).

1.1.3.3 Conditionnement des laitiers de haut-fourneau et scories

Après refroidissement, les laitiers de haut-fourneau et les différentes scories sont conditionnés dans une installation de traitement comprenant des opérations d'élimination, de broyage, de criblage et de récupération de métaux.

Par la suite, s'ensuit une période assez longue de maturation pour les scories afin de provoquer l'hydratation de la chaux libre.

a. Élimination des éventuels éléments de fonte

Lors du traitement des laitiers sidérurgiques, il peut rester des éléments de fonte qu'il convient de récupérer pour leur teneur en acier.

Ces éléments sont ensuite réintroduits dans le haut-fourneau.

b. Concassage, criblage et élimination des métaux ferreux et non ferreux par méthode sèche

Le laitier ou la scorie, une fois refroidi, passe à travers une série de concasseurs (*à mâchoires ou giratoires*) et de cribles (*vibrants*) en vue de réduire sa taille. Le matériau passe ensuite à travers les dispositifs de récupération de métaux ferreux (*overband magnétique*) et non ferreux (*séparateur à courants de Foucault*) avant d'être criblé en vue de réaliser différentes classes granulaires de laitier ou de scorie fraîche. Les éléments plus grossiers sont réinjectés dans l'installation de traitement.

REMARQUE : Vu la dureté et l'abrasivité des matériaux, l'installation doit être conçue avec des matières très résistantes.

En fin de traitement, des échantillons sont prélevés pour déterminer la teneur en chaux libre. Le résultat conditionne l'étape suivante.

La fraction fine ($\varnothing < 10 \text{ mm}$) est généralement stockée à part et ne subit pas nécessairement l'étape suivante si elle est utilisée comme liant aérien, vu sa teneur relativement élevée en chaux libre.



Figure 1.3 : Vue du traitement des scories.

c. Traitement par voie humide

Le traitement humide permet une meilleure récupération des particules et oxydes métalliques. La méthode consiste à réaliser après un ensemble d'opérations à sec (*concassage, séparations diverses et criblage*), un broyage en voie humide en vue d'obtenir un matériau fin ($0/100 \mu m$) ou filler qui est ensuite versé dans un bac d'eau agitée où une séparation densimétrique permet de récupérer les fines particules métalliques. Le tout est séché selon différentes techniques (*essorage, filtre-pressé ou tambour rotatif*).

d. Maturation des scories

La scorie fraîchement fragmentée doit subir un période de maturation de quelques semaines à quelques mois en tas externe soumis aux précipitations afin d'hydrater toute la chaux libre présente en surface des éléments et empêcher tout gonflement éventuel ultérieur selon la réaction suivante :



Elle est disposée idéalement en tas de hauteur proportionnelle à leur calibre afin de favoriser au maximum, la maturation et ainsi d'accélérer le processus de stockage.

Cette étape peut être accélérée en arrosant le tas ou en y injectant de la vapeur d'eau. D'autres techniques de neutralisation existent.

REMARQUE : La maturation de la scorie n'a pas toujours été réalisée correctement dans le passé suite au manque de délai d'attente ou de place. Ce raccourcissement de délai s'est souvent soldé par l'apparition de gonflements ponctuels et de fissures sur les routes après quelques années.

e. Echantillonnage des sous-produits

L'échantillonnage de la scorie peut se réaliser à deux moments :

- **A l'état liquide** (*prélèvement dans le cuvier*), l'échantillon fournit des informations sur la composition de l'acier (*évolution du processus*) et de la scorie (*indice de basicité*) ;
- **A l'état solide** (*scorie refroidie*), l'échantillon est placé dans un contenant hermétique et rapidement séché (*étuve à 50°C*) afin d'immobiliser la réactivité des matériaux. La température au sein du stock est de l'ordre de 60 à 90°C.

1.2 CONTEXTES

1.2.1 Contexte historique

1.2.1.1 Sidérurgie

Les premières traces de la sidérurgie remontent au 17^{ème} siècle avant Jésus-Christ. En effet, à l'époque, l'homme utilisait de la tourbe pour se chauffer et il s'avère que cette tourbe contenait une certaine quantité de minerais. Il est fort probable qu'après un important feu, il soit resté dans la cendre, des morceaux d'éponge de fer que l'homme a alors forgé en les remettant dans un feu. La sidérurgie était née.

Par la suite, la fonte est apparue en faisant brûler de grandes quantités de fer.

Cependant, l'activité sidérurgique est en cours de déclin sur le continent européen. Cela se traduit par une diminution dans la production de sous-produits industriels.

1.2.1.2 Laitier de haut-fourneau

Les premiers hauts-fourneaux datent du moyen-âge. Toutefois, le haut-fourneau moderne date du milieu du 19^{ème} siècle avec l'amélioration des techniques de soufflerie.

Pendant longtemps, le laitier de haut-fourneau considéré comme un déchet, a été stocké à proximité de l'usine, formant ainsi des stocks de plus en plus volumineux. Par la suite, les producteurs de fonte ont été obligés de les transporter plus loin dans des crassiers où ils subsistent toujours (*Liège, Charleroi, Lorraine, etc.*), bien qu'exploités localement.

Le laitier de haut-fourneau a été le premier matériau enrobé de goudron avant d'être appliqué sur la route. En 1901, l'anglais **E. Purnell**, fondateur de la société Tarmac, découvre, après avoir renversé par accident, un tonneau de goudron sur une voirie que d'anciens laitiers prélevés dans un terril avoisinant, absorbent le goudron et permettent de nettoyer la voirie. Le mélange durci permet également de freiner la production de fines et de réduire la présence d'orniérage. Suite à cette observation, il dépose un brevet et lui donne le nom de Tarmacadam, association du nom de l'Écossais **Mac Adam**, innovateur des empièvements routiers et le mot anglais Tar qui signifie goudron en anglais. Ce produit a connu un réel succès après la Deuxième Guerre mondiale. Par la suite, il a connu un déclin, vu que les laitiers sont devenus intéressants pour les cimentiers et que le goudron a été interdit dans les années 1990 pour son caractère cancérigène. Une autre raison de son déclin, notamment en Hollande, en manque de granulats primaires, est l'apparition de propriétés liantes qui ont tendance à se développer en zones gorgées d'eau (*fréquentes en Hollande*) ; ce qui génère de nombreuses fissures de retrait dans le revêtement hydrocarboné.

1.2.1.3 Scorie ou laitier d'aciérie

La scorie a une histoire similaire à celle des laitiers de haut-fourneau.

Tout comme le laitier de haut-fourneau, il existe également des crassiers composés de scories.

A partir des années 1930, les filières de valorisation se sont organisées, suite notamment au développement du réseau routier et à l'invention du macadam (*mélange granulats – goudron*). Les scories sont ainsi passées du statut négatif de déchet à celui de sous-produit dont l'éventail des propriétés est aujourd'hui apprécié et recherché.

1.2.2 Contexte économique

Le tableau ci-dessous reprend quelques valeurs de production afin de pouvoir se faire une idée des volumes produits et des filières de valorisation.

Tableau 1.I : Quelques chiffres de production.

Pays	Laitier de haut-fourneau	Scorie
Allemagne		6,5 Mt (2007)
France	3,1 Mt (2016) 2,3 Mt laitier vitrifié 0,7 Mt laitier cristallisé	1,1 Mt (2016)

1.2.3 Contexte juridique

1.2.3.1 Europe

Deux textes européens conditionnent le devenir des déchets issus de l'activité sidérurgique :

- La **Directive-cadre Déchets** (2008/98/CE) classe notamment ces déchets selon la classification européenne des déchets ;

Tableau 1.II : Principaux codes associés aux déchets de l'acier selon la classification européenne des déchets.

Code	Nature des déchets
10	Déchets provenant de processus thermiques
10 02	Déchets provenant de l'industrie du fer et de l'acier
10 02 01	Déchets de laitiers de haut-fourneaux et d'aciéries
10 02 02	Laitiers non traités

- Le **règlement européen 2011/333** concernant la sortie de statut des déchets des débris métalliques ;

- La *Directive 2013/511 Euratom* fixe les normes de base relatives à la protection sanitaire contre les dangers résultant de l'exposition aux rayonnements ionisant et impose une caractérisation radiologique pour certains matériaux en construction à usage du bâtiment, dont les laitiers et scories.

Ces textes ont été transposés aux règlements nationaux.

REMARQUE : En Wallonie, les scories sont généralement classées dans la catégorie 10 02 02 alors qu'en France, les laitiers d'aciérie peuvent être classés sous les codes 10 02 01 ou 10 02 02 selon le site de production.

1.2.3.2 Wallonie

La valorisation des déchets issus de la production d'acier est principalement régie par l'*Arrêté du Gouvernement Wallon du 14 juin 2001* concernant la valorisation de certains déchets, moyennant certaines conditions :

- Ils doivent faire l'objet d'une *comptabilité*. La scorie inox doit faire l'objet d'un certificat d'utilisation, soit un document contenant l'autorisation de l'administration régionale, la liste des dernières analyses environnementales et un manuel d'utilisation (*caractérisation du matériau et conditions d'utilisation*) ;
- Ils doivent faire l'objet d'un *conditionnement dans une installation autorisée* ;
- Ils peuvent être *utilisés*, moyennant le respect du CCT en vigueur, en sous-fondation, fondation, revêtement, accotement et comme ballast de chemin de fer. Dans le cas d'une application en remblai, le CCT Qualiroutes précise au chapitre C.2.2.1 qu'ils peuvent être utilisés s'ils sont autorisés dans les documents de marché. A défaut, ils sont interdits.

1.2.3.3 Flandre

Le producteur ou l'utilisateur doit obtenir un *certificat d'utilisation* auprès de l'OVAM (*Administration flamande de l'environnement*) sur base de critères purement environnementaux (*test de lixiviation*).

1.2.3.4 France

En 2016, le Ministère français en charge de l'environnement (*MEDDE*) a reconnu les laitiers de haut-fourneau et les laitiers d'aciérie comme substance et non plus comme un déchet, soit un produit issu de la Sortie Statut de Déchet (SSD).

La transcription de la Directive Euratom en droit français impose une caractérisation radiologique pour les laitiers utilisés en bâtiment depuis le 1^{er} juillet 2020. Un guide interprofessionnel établi à ce sujet fournit des recommandations de caractérisation radiologique pour les différents matériaux.

1.2.4 Contexte environnemental

1.2.4.1 Risque de pollution

Les laitiers de haut-fourneau et un certain nombre de scories ne présentent aucun risque de pollution.

Outre les scories inox qui peuvent contenir une teneur plus importante en chrome, l'ensemble des scories contiennent des métaux lourds en quantité généralement inférieure au critère requis dans les cahiers des charges. Des études de lixiviation sont toutefois requises pour un bon nombre de scories. Les résultats varient selon le type de scorie et la nuance de l'acier.

1.2.4.2 Bilan Carbone et ACV

- Le *laitier moulu* également appelé *ciment vert* par sa substitution au ciment Portland, permet de réduire la consommation énergétique, l'émission de CO₂ (*90% de réduction*), de fumées, de poussières, de SO₂ et de NO_x tout en préservant les ressources naturelles et l'effet de serre. Ainsi, une tonne de laitier granulé à la place d'une tonne de ciment CEM I permet d'économiser 850 kg de CO₂ ainsi que 1,5 tonne de matériaux de carrière.
- Les *scories* : Une étude française (*Climatmundi : 2019*) a étudié l'empreinte carbone de scories sur 2 sites : Dunkerque (*SGA*) et Ugine (*Harsco*) en délimitant l'étude depuis la zone de refroidissement jusqu'au chargement du camion prêt à partir sur chantier, soit les opérations de stockage et de traitement (*concassage, séparation et criblage*). Les principales valeurs sont reprises dans le tableau ci-dessous.

Tableau 1.III : Quelques valeurs obtenues sur l'empreinte carbone de scories sidérurgiques à partir de la Base Carbone® (Climatmundi : 2019).

Matériau	Eq _{CO2E} /T
Scorie	0,15 - 0,80
Granulat naturel	2,6 - 2,8
Transport	Double tous les 8 km
Domaine d'application	
Empierrement de fondation	1
Béton C25/30	100
Enrobé bitumineux à module élevé	55

1.2.4.3 Cas particulier de la France : Acceptabilité environnementale

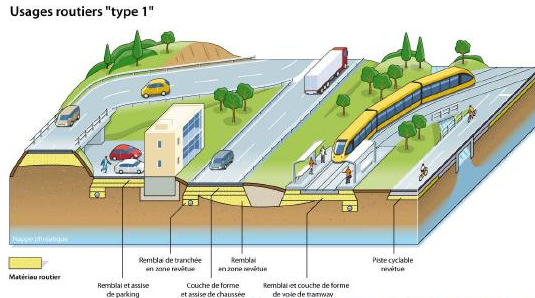
En France, l'emploi des laitiers sidérurgiques (*haut-fourneau et aciérie*) en domaine routier est soumis à certains critères définis par le guide d'acceptabilité environnementale de matériaux alternatifs en technique routière : Les laitiers sidérurgiques (*Sétra : 2012*).

Ce guide précise en autres, 3 catégories d'usages routiers (*pour de plus amples informations, voir guide*) :

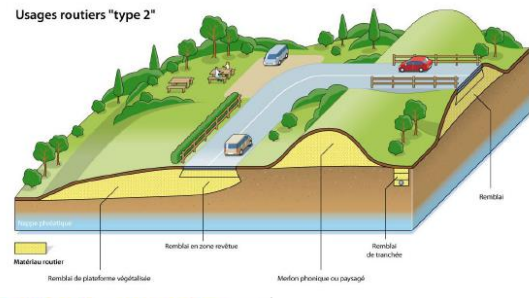
- L'*usage routier de type 1* comprend toutes les structures **revêtues** de relativement faible épaisseur (≤ 3 m). Il s'agit de structures (*remblai, tranchée, couches de base et de fondation*) situées sous un revêtement étanche (*à l'abri total des venues d'eau superficielles*). Cet usage autorise des valeurs critères relativement élevées, en ce qui concerne la lixiviation. Ainsi, par exemple, le critère pour le chrome est de 4 mg/kg de matière sèche ;
- L'*usage routier de type 2* comprend les structures **recouvertes** par une couche plus ou moins imperméable (*par exemple, sol végétal ou revêtement granulaire*) (*contact limité avec les venues d'eau superficielles*). Il s'agit notamment des structures sous voirie non revêtues ou des accotements. Cet usage autorise des valeurs critères plus faibles en ce qui concerne la lixiviation. Ainsi, par exemple, le critère pour le chrome est de 2 mg/kg de matière sèche ;
- L'*usage routier de type 3* comprend les structures **en contact direct avec les eaux superficielles**. Il s'agit des couches de revêtement de surface. Cet usage autorise des valeurs critères assez strictes en ce qui concerne la lixiviation. Ainsi, par exemple, le critère pour le chrome est de 0,6 mg/kg de matière sèche ;

REMARQUE : Pour les usages routiers ne figurant pas dans le guide Sétra, une étude spécifique doit être réalisée, conformément à la méthodologie du guide et doit être soumise à l'administration (DREAL) pour approbation.

Les usages de type 1 ou « revêtus »



Les usages de type 2 ou « recouverts »



Les usages de type 3 « non-revêtus/recouverts »

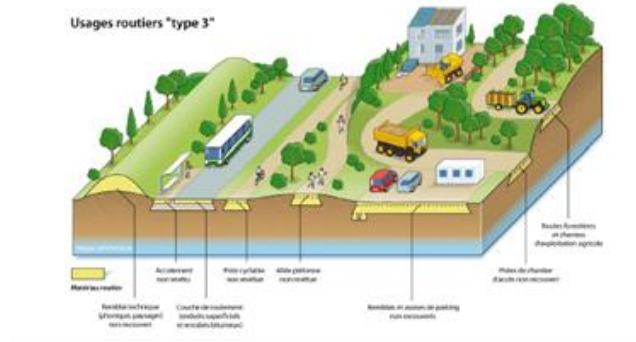


Figure 1.4 : Description des usages routiers selon le type (Sétra : 2012)

Il existe également des limitations liées à l'environnement immédiat comme la proximité de nappe phréatique, de zones de captage, de zones de karsts affleurants ou les parcs nationaux. Dans ce cas, une étude spécifique doit être également réalisée par un hydrogéologue-expert qui s'aide notamment de grille de lecture présente dans le guide Sétra.

2. LAITIERS DE HAUT-FOURNEAU

2.1 GENERALITES

2.1.1 Définition

Le *laitier de haut-fourneau* est un sous-produit issu de la transformation dans un haut-fourneau du minerai de fer en fonte en présence de coke et d'adjuvants (chaux, magnésie). Son aspect à chaud ressemble à du lait ; d'où son nom.

2.1.2 Classification

Il existe deux familles de laitier de haut-fourneau selon le mode de refroidissement.

- Le *laitier cristallisé* ou *laitier concassé* est issu d'un refroidissement lent à l'air permettant un arrangement des éléments au sein d'une structure cristalline avec arrosage modéré d'eau pour fissurer le massif. Il a une certaine structure poreuse suite à l'évacuation des poches gazeuses. Il est par la suite concassé ;
- Le *laitier vitrifié* subit un refroidissement quasi instantané sous eau accompagné éventuellement d'une injection d'air sous pression qui fige les éléments sur place et forme une structure vitreuse. Deux types existent :
 - Le *laitier (vitrifié) granulé* est refroidi dans un granulateur (bassin où est injecté de l'eau à haute pression) ou par une trempe dans un bassin. Il est par la suite essoré, mis en tas et éventuellement séché pour être finalement broyé. Cela donne un *laitier moulu* très utilisé en cimenterie ;
 - Le *laitier (vitrifié) bouleté* est refroidi par projection du laitier sur un tambour tournant cannelé (bouletage) qui comporte des trous alimentés en eau sous pression. Les éléments sont alors projetés à plusieurs mètres du tambour, ce qui permet un contact à l'air pendant la durée du trajet des particules. En France, seul, le site de Fos-sur-Mer réalise ce type de refroidissement.

En France, le guide GTR classe les différents laitiers de haut-fourneau dans la catégorie F8 (*sous-produits industriels – laitiers de haut-fourneau*).

2.2 CARACTERISATION

2.2.1 Aspect visuel

REMARQUE : Un examen à la lampe UV permet de distinguer le laitier frais du vieux laitier car elle met en évidence la chaux libre.

2.2.1.1 Laitier cristallisé ou laitier concassé

Le *laitier cristallisé* (refroidissement lent) se présente sous forme d'un granulat gris clair à grains fins, relativement compact (*pas d'arrosage à l'eau durant son refroidissement*) à légèrement poreux (*présence d'un arrosage d'eau*) et relativement dense. Ses faces anguleuses sont liées aux opérations de concassage. Il ne présente pas de propriétés hydrauliques mais possède des propriétés mécaniques élevées (*variable selon son taux de porosité*).



2.2.1.2 Laitier vitrifié

Le *laitier vitrifié* (refroidissement brutal) se présente sous forme d'un granulat jaune beige à texture vitreuse ou amorphe. Il présente de bonnes propriétés hydrauliques (*présence d'une certaine énergie latente suite au refroidissement brutal*) en présence d'un activant (*chaux*) qui sont augmentées par un broyage fin après séchage pour donner lieu au *laitier moulu*. La granulométrie dépend du mode de refroidissement (*bouletage ou granulateur*).



- Le *laitier vitrifié granulé* se présente sous forme d'un sable grossier jaune paille avec une tendance grisâtre ;
- Le *laitier vitrifié bouleté* se présente sous la forme d'une grave.

2.2.2 Compositions minéralogique et chimique

Le laitier de haut-fourneau est principalement composé de silicates et de silico-aluminates de chaux, de quelques oxydes, sulfures et exceptionnellement des nitrures.

La composition chimique moyenne du laitier de haut-fourneau est reprise ci-dessous.

Tableau 2.I : Composition chimique générale du laitier de haut-fourneau.

Elément chimique	Teneur moyenne (%)	Commentaires
CaO	35 - 50	Elément ajouté en grande quantité pour purifier l'acier Présent principalement sous forme cristalline et donc peu de chaux libre ⇒ Peu de risque de gonflement volumique
SiO ₂	27 - 45	
Al ₂ O ₃	5 - 20	Détermine la réactivité
Fe ₂ O ₃	0,1 - 5	
MgO	1 - 10	Participe au développement de la résistance (≠ clinker)
Mn ₂ O ₃	0,3 - 0,7	
S	0,5 - 1	
SO ₃	1 - 2	
TiO ₂	0,5 - 1	
Alcalins	0,5 - 2	

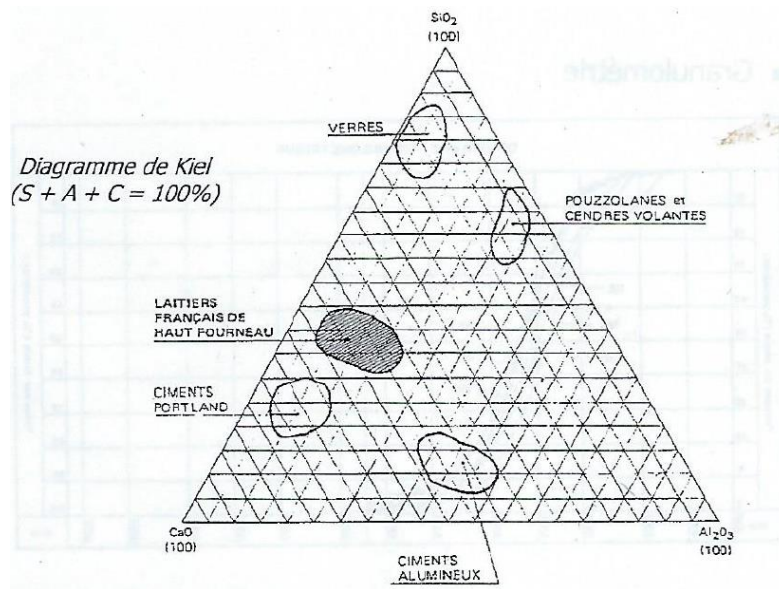


Figure 2.1 : Diagramme de Kiel (source : internet).

Une partie des métaux lourds sont piégés dans certaines structures minéralogiques et ne présentent aucun risque de pollution à l'exception d'un changement de conditions chimiques (pH, potentiel d'oxydo-réduction). La détermination de leur teneur n'est donc pas représentative du potentiel polluant.

Sur base de leur composition chimique, trois paramètres ont pu être définis :

- Le **module de basicité** permet de vérifier que le laitier de haut-fourneau est basique et donc apte à une activité alcaline. La valeur doit être supérieure à 1 ;

$$\frac{\text{CaO} + \text{MgO}}{\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3}$$

- Le **module** ou **indice d'activité** permet d'estimer les propriétés hydrauliques du laitier de haut-fourneau granulé moulu. La valeur doit être comprise entre 0,12 et 0,75 pour avoir de bonnes propriétés hydrauliques ;

$$\frac{\text{Al}_2\text{O}_3}{\text{SiO}_2}$$

- La **stabilité du laitier** permet de déterminer la tendance du laitier de haut-fourneau à rester intact (valeur inférieure à 1,5) ou à se décomposer (laitier fusant typique d'un laitier granulé).

$$\frac{\text{CaO}}{\text{SiO}_2}$$

2.2.3 Caractéristiques environnementales

Le laitier de haut-fourneau ne présente pas de risque environnemental particulier ; c'est pourquoi il est considéré comme un sous-produit non dangereux. Il ne doit pas faire l'objet d'exigences environnementales particulières concernant sa valorisation. Un contrôle en production est toutefois nécessaire.

REMARQUE : La France (SETRA) a rédigé un guide spécifique d'évaluation environnementale pour l'utilisation des laitiers en technique routière. Le programme européen SESAR (*StEel Slag roAd and enviRonment*) a étudié les processus de lixiviation de certains composés (*sulfates et calcium*) selon notamment le pH.

Toutefois, il faut être attentif aux points suivants :

- La **teneur particulièrement élevée en chaux** dont le contact avec l'eau et le sol peut conduire à une augmentation du pH (*milieu basique*) par solubilisation importante d'ions calcium ;
- Le **risque de radioactivité naturelle** est minime. De faibles valeurs de radioactivité naturelle ont été mesurées mais restent inférieures aux valeurs-critère.

2.2.4 Caractéristiques géotechniques

2.2.4.1 Essais classiques

Les principales caractéristiques géotechniques des laitiers de haut-fourneau sont reprises ci-dessous.

Tableau 2.II : Principaux paramètres géomécaniques des laitiers de haut-fourneau.

Caractéristiques	Valeurs	Commentaires
Paramètres géométriques <i>Courbe granulométrique</i> <i>Teneur en fines (f)</i> <i>Qualité des fines (MB)</i> <i>Forme des grains (Flx)</i> <i>Arêtes des grains</i>	Fonction de l'installation de traitement Valeurs faibles Grains cubiques et rectangulaires Anguleuses	Valeurs constantes pour une installation donnée Processus thermiques empêchant toute formation d'argiles Moins de 2 % d'éléments longs et plats
Paramètres physiques <i>Masse volumique réelle</i> <i>Masse volumique en vrac</i> <i>Coefficient d'absorption (W_A)</i>	2,4 – 3,0 t/m ³ 1,2 – 1,6 t/m ³ < 4 %	Matériau plus dense que le granulats classique (1,2 – 1,4 t/m ³ : Laitier cristallisé)
Paramètres chimiques <i>Teneur en matières organiques</i> <i>Teneur en soufre et sulfates</i>	Valeur faible Valeur faible Sauf pour laitier cristallisé	Processus thermiques Attention en cas de traitement hydraulique
Paramètres de durabilité mécanique <i>Essai Micro-Deval (MD_E – attrition)</i> <i>Essai Los Angeles (LA – fragmentation)</i> <i>Coefficient de polissage accéléré (CPA – usure)</i>	8 – 17 15 – 25 48 – 56	Excellente résistance à l'attrition Bonne résistance à la fragmentation Résistance moyenne à l'usure
Paramètres de durabilité climatique <i>Sensibilité au gel – dégel</i> <i>Essai au sulfate de magnésium</i>	Pas de valeur connue Pas de valeur connue	

REMARQUE : La norme EN 13242 (*annexe B.2.3*) précise que pour le laitier de haut-fourneau, il n'existe pas de corrélation entre l'absorption d'eau généralement élevée et la sensibilité au gel-dégel (*matériau peu sensible*). Cet essai ne peut donc être utilisé comme essai de sélection de la sensibilité à l'action du gel – dégel.

2.2.4.2 Essais spécifiques

Plusieurs essais spécifiques aux laitiers de haut-fourneau existent pour certaines applications :

- La **finesse Blaine** concerne la *surface spécifique des grains* et donc la vitesse d'hydratation du liant. Ce paramètre s'applique au laitier vitrifié granulé pour une application en liant hydraulique. Plus la valeur est élevée, plus rapide est l'hydratation et plus élevées sont les résistances mécaniques au jeune âge du béton ou matériau lié mais par contre, plus le retrait est important. Bien que fonction des opérations de broyage, le laitier de haut fourneau granulé présente une valeur comprise entre 350 et 450 m²/kg (3 500 à 4 500 Blaine), soit une valeur supérieure au critère de la norme (≥ 300 ou 350 m²/kg) ;

- L'**activité** caractérise le *pouvoir hydraulique du laitier granulé* employé dans une application liée (*empierrement laitier, sable – laitier, béton*). Deux essais permettent d'estimer ce paramètre :
 - *Le coefficient d'activité (α)* est obtenu en déterminant la surface spécifique des grains obtenue après passage de l'échantillon 0/5 (500 gr) dans un broyeur à boulets. En effet, le laitier granulé est un matériau friable qui tend à se décomposer lors de sa fabrication et son compactage et à former une certaine quantité de filler. Le broyage préalable de l'échantillon tient compte de cette friabilité.

$$\alpha = S.P/10^3 \text{ (cm}^2/\text{gr)} \quad (S : \text{surface spécifique des grains } \varnothing < 80 \mu\text{m et } P : \text{Passant à } 80 \mu\text{m après broyage}).$$

Ce paramètre similaire à la finesse Blaine, permet d'établir une classification du laitier granulé frais : 0-20 (*classe 1*), 20-40 (*classe 2*), 40-60 (*classe 3*) et > 60 (*classe 4*). La valeur dépend notamment de la teneur en phosphore et de la température du haut-fourneau (*α augmente de manière non linéaire si T° augmente*). Seules, les 3 dernières catégories peuvent être utilisées en domaine routier. Un laitier riche en phosphore et issu d'un four à moins de 1 500°C se caractérise par une valeur α inférieure à 25. Les laitiers produits à Charleroi et dans le Nord-Pas-de-Calais étaient de la classe 2 (< 40). Dans le passé, ce critère permettait de fixer un prix au matériau.

Ce paramètre permet 1) de contrôler la régularité des propriétés hydrauliques d'un lot, 2) de choisir le laitier granulé en fonction de la nature du granulat, des caractéristiques de l'assise traitée à obtenir et des conditions de chantier et 3) de prévoir avec une bonne approximation, la résistance à 60 jours d'un empierrement – laitier ;

REMARQUE : Cet essai ne s'applique pas aux vieux laitiers dont le stockage a modifié les propriétés physiques ainsi qu'aux laitiers granulés contenant plus de 5% d'oxyde de manganèse.

- *L'indice d'activité* est obtenu par comparaison de la résistance à la compression (7 et 28 j) de deux mortiers : 1) un mortier contenant 50% de laitier moulu et 50% du ciment de référence (CEM I) et 2) un mortier de référence (100% CEM I). Le rapport $R_{\text{mélange}}/R_{\text{référence}}$ constitue l'indice d'activité. La valeur mesurée sur le laitier granulé est généralement supérieure aux critères exigés (0,45 à 7 j et 0,7 à 28 j).
- La **basicité** concerne le laitier bouleté ;
- La **désintégration du silicate bicalcique** concerne également le laitier bouleté ;
- La **désintégration du fer** concerne le laitier bouleté ;
- L'**instabilité dans l'eau** concerne le laitier bouleté.

2.3 VALORISATION MATIERE

Les filières de valorisation varient selon le type de laitier de haut-fourneau et surtout de la présence ou non de propriétés hydrauliques.

REMARQUE : Avec la fermeture des haut-fourneaux en Europe, ces matériaux sont devenus une denrée rare et destinés principalement au cimenterie.

Tableau 2.III : Liste des principales filières de valorisation matière des laitiers de haut-fourneau.

Domaine	Laitier cristallisé	Laitier vitrifié (<i>moulu</i>)
Propriétés hydrauliques	Non	Oui
<u>Route et voie ferrée</u>		
Revêtement hydrocarboné	OK (<i>attention au CPA</i>)	OK
Revêtement béton	---	OK (<i>liant ou granulat</i>)
Ballast	OK (<i>rarement utilisé</i>)	Non
Fondations	OK (<i>granulat</i>)	OK (<i>liant ou granulat</i>)
Sous-fondation	OK (<i>granulat</i>)	Non
Remblai	OK (<i>granulat</i>)	Non
<u>Autres domaines du génie civil</u>		
Ciment	---	OK (<i>liant</i>)
Béton, mortier et coulis	OK (<i>granulat</i>)	OK (<i>liant ou granulat</i>)
Briques	---	OK (<i>liant</i>)
Amélioration de fondation et sols	---	OK

Traitement de matériaux biosourcés	---	OK
Laine isolante	OK	OK
Brique de laitier	---	OK
<u>Environnement</u>		
Inertage de sols pollués	---	OK
Paroi d'étanchéité de CET	---	OK
<u>Autres</u>		
Agriculture	---	OK
Traitement des métaux	---	OK
Verrerie	---	OK

2.3.1 Laitier de haut-fourneau cristallisé

REMARQUE : Le laitier de haut-fourneau cristallisé est peu produit actuellement en Belgique et donc peu valorisé.

Tableau 2.IV : Avantages et inconvénients du laitier de haut-fourneau cristallisé.

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> ● <i>Densité élevée</i> permettant une valorisation en applications "pesantes" (<i>poids-masque, etc.</i>). ● <i>Forme cubique et arêtes anguleuses des grains</i> permettant d'obtenir une bonne compacité et une bonne résistance à la compression (<i>application liée</i>), moyennant une énergie élevée de compactage. ● <i>Excellentes résistances à l'attrition et à la fragmentation.</i> ● <i>Excellentes compatibilité et adhérence avec tout type de liant</i> (<i>chaux, ciment, LHR, bitume</i>) du fait de sa nature basique et sa structure micro poreuse. ● <i>Conductivité thermique faible</i> permettant une bonne résistance au feu. 	<ul style="list-style-type: none"> ● <i>Densité plus élevée</i> que les granulats naturels ⇒ Coût plus élevé de transport et béton plus dense. ● <i>Valeur moyenne à faible du coefficient de polissage accéléré</i> (CPA) ⇒ Pas d'application en couche de roulement hydrocarboné. ● <i>Absence de propriétés hydrauliques et pouzzolaniques</i>, même en présence d'un activant ⇒ pas d'application comme liant mais uniquement application comme granulat. ● <i>Risque de décoloration de l'eau superficielle, de dégagement d'une odeur sulfurée et de développement plus rapide de plaques de gel en surface</i> pour une application en revêtement (COST 337).

2.3.1.1 Routes et voies ferrées

Les seules applications possibles sont des applications granulaires (*absence de propriétés hydrauliques*), moyennant le respect de certains critères fixés dans les cahiers des charges.

Tableau 2.V : Prescriptions du CCT QUALIROUTES pour les applications du laitier cristallisé.

Caractéristique	Prescription
Conditions générales	Matériau homogène, pur, non vitreux et peu poreux.
Masse volumique sèche en vrac	> 1,2 t/m ³
Basicité ou stabilité (CaO/SiO ₂)	≤ 1,5
Absorption d'eau (DIN 52103)	≤ 4 %
Instabilité dans l'eau	Négatif
Désintégration du silicate bicalcique	Négatif

a. Revêtement

a.1 Revêtement hydrocarboné

Le laitier de haut-fourneau cristallisé peut être utilisé comme granulat de revêtement hydrocarboné, vu la forme anguleuse des grains et l'excellente adhésivité du bitume qui peut introduit à faible dosage. Par contre, pour une application en couche d'usure, il faut vérifier le coefficient de polissage accéléré.

Il peut être utilisé dans différents types d'enrobés hydrocarbonés (*classique, mince grenu, à froid, etc.*) et dans les enduits superficiels. En Région Wallonne, il n'est pas autorisé.

a.2 Revêtement en béton

Il n'y a pas d'application, étant donné le risque alcali-silice possible.

a.3 Ballast de voies ferrées

Cette application la plus ancienne en France n'est plus utilisée de nos jours, vu les critères de plus en plus exigeants pour les lignes à grande vitesse et à trafic dense et le risque d'interférence, suite à la présence de fer.

b. Fondation (Belgique) ou assises de chaussée (France)

b.1 Fondation en béton maigre (poreux) et béton sec compacté

Le laitier de haut-fourneau cristallisé peut être utilisé avec un liant hydraulique (*ciment ou laitier vitrifié moulu*). En Région Wallonne, il est autorisé pour ces applications.

b.2 Fondation en empièrrement (lié ou non)

Le laitier de haut-fourneau cristallisé peut être utilisé avec ou sans liant hydraulique. En Région Wallonne, il est autorisé pour cette application. En France, elle est limitée à certains trafics.

c. Sous-fondation en empièrrement non lié (Belgique) et couche de forme (France)

Le laitier de haut-fourneau cristallisé peut être utilisé sans liant hydraulique. En Région Wallonne, il est autorisé pour cette application. En France, il rentre dans la catégorie GNT (*grave non traitée*).

REMARQUE : La classification française GTR range le laitier de haut-fourneau cristallisé dans la catégorie D21 et D31 selon la coupure granulométrique. Sa mise en œuvre doit se faire en l'absence de pluie.

d. Remblai et terrassement

Le laitier de haut-fourneau cristallisé peut être utilisé, soit sous sa forme brute ($0/>300$), soit sous une forme conditionnée ($0/D$). Il est généralement destiné à des remblais particuliers nécessitant souvent un surpoids : masque drainant, ...

2.3.1.2 Autres domaines du génie civil

a. Béton

Le laitier de haut-fourneau cristallisé peut être utilisé comme granulat dans certains bétons en raison de sa densité plus élevée (*béton dense*) ou de sa teneur plus élevée en oxydes de fer (*béton résistant à la chaleur et isolant*). Un béton composé de laitier est deux fois plus isolant qu'un béton classique à épaisseur égale.

REMARQUE : En modifiant la méthode de refroidissement, il est possible d'obtenir un granulat plus léger en vue de pouvoir l'utiliser dans un béton structural.

b. Laine de roche

2.3.1.3 Environnement

Pas d'application connue.

2.3.2 Laitier de haut-fourneau vitrifié

Tableau 2.VI : Avantages et inconvénients du laitier de haut-fourneau cristallisé.

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> ● <i>Forme cubique et arêtes anguleuses des grains</i> permettant d'obtenir une bonne compacité et de bonnes résistances à la compression (<i>application liée</i>), moyennant une énergie élevée de compactage. ● <i>Excellentes résistances à l'attrition et fragmentation.</i> ● <i>Excellentes propriétés hydrauliques et pouzzolaniques</i> pour le laitier moulu en présence d'un activant ⇒ Production d'un ciment CEM III aux caractéristiques d'hydratation et de résistances (<i>mécaniques et attaques chimiques</i>) spécifiques ainsi qu'un faible bilan carbone. ● <i>Excellente compatibilité et adhérence avec tout type de liant</i> (<i>chaux, ciment, LHR, bitume</i>) du fait de sa nature basique et sa structure micro poreuse. ● <i>Conductivité thermique faible</i> permettant une bonne résistance au feu. 	<ul style="list-style-type: none"> ● <i>Densité plus élevée</i> que les granulats naturels ⇒ Coût plus élevé de transport. ● <i>Valeur moyenne à faible du coefficient de polissage accéléré (CPA)</i> ⇒ Pas d'application en couche de roulement hydrocarboné.

2.3.2.1 Importance de l'activant dans les réactions hydrauliques

En l'absence d'activant basique, les réactions d'hydratation du laitier de haut-fourneau vitrifié ne s'amorcent pas. La mobilité de la silice est fonction de l'alcalinité du milieu. La faible teneur en chaux libre du laitier de haut-fourneau vitrifié conduit à une précipitation rapide de la silice sous forme de gel qui entoure les grains et arrête l'évolution des réactions hydrauliques. Le rôle de l'activant est de fournir un composant basique qui permet d'éviter la formation du gel et ainsi de favoriser la pénétration de l'eau dans les grains afin de démarrer et poursuivre les réactions hydrauliques.

Plusieurs types d'activants basiques sont utilisés à raison de 1 à 2 % du poids sec du mélange :

- L'**activant calcique** (chaux calcique ou dolomitique, clinker Portland) attaque la structure vitreuse du laitier pour former du CSH. Le clinker Portland (CEM III) apporte plus d'hydraulicité et offre de bonnes performances du matériau ;
- L'**activant sulfato-calcique** (mélange chaux - gypse ou gypsonat et cendres volantes) mobilise le mieux les propriétés hydrauliques du laitier et conduit à des performances mécaniques élevées, grâce à la formation d'ettringite primaire.

2.3.2.2 Liant hydraulique

a. Ciment

En raison de ses propriétés hydrauliques et pouzzolaniques, le laitier de haut-fourneau vitrifié frais est presque totalement utilisé en cimenterie sous sa forme moulue. Il intervient, soit comme composant principal dans le ciment CEM III (35 à 95%), CEM II (6 à 35%) et CEM IV (18 à 38%).

Le ciment CEM III se distingue du ciment pur clinker (CEM I) par les points suivants :

- Un **temps de prise plus long** variable avec le dosage. Par exemple, le temps de prise d'un béton au CEM I est de 2 heures alors qu'un béton avec un mélange 70% laitier - 30% ciment Portland est d'environ 3 h 30 ;
- Une **résistance plus faible à l'âge jeune** due au temps de prise plus long ;
- Une **résistance supérieure ou équivalente à moyen et long terme** car les silicates hydratés du laitier moulu fournissent au béton, une structure plus dense et le laitier réagit avec la chaux libérée par le ciment pour former un hydrate insoluble ;

Tableau 2.VII : Influence du taux de remplacement du ciment par le laitier sur la résistance en compression du béton.

Mélange		Résistance à la compression (MPa)			
% Ciment Portland	% Laitier haut-fourneau	3 jours	7 jours	28 jours	91 jours
100	0	150	264	429	491
70	30	132	227	435	540
50	50	99	181	431	589
30	70	67	151	356	548

- La **chaleur d'hydratation plus faible** réduit le risque de microfissuration et augmente donc la durabilité du béton. La chaleur d'hydratation est inversement proportionnelle à la teneur en laitier moulu. A un taux de remplacement de 70%, le laitier moulu réduit d'un facteur deux, la chaleur d'hydratation d'un béton de masse ;
- Une **meilleure durabilité** : Les produits d'hydratation du laitier granulé moulu sont des silicates de calcium hydratés (CSH) de texture plus dense que les silicates hydratés du clinker Portland ; ce qui explique une meilleure durabilité du béton ;
- Une **meilleure résistance aux sulfates** : L'absence d'aluminate tricalcique hydraté et de portlandite (Ca(OH)₂) dans le laitier moulu empêche la formation d'ettringite et de thaumasite et donc l'apparition de gonflement dans le béton ;
- Une **meilleure résistance aux chlorures** provenant des sels de déverglaçage et de l'eau de mer ;
- Une **meilleure résistance au feu** : Le laitier moulu augmente les performances du béton soumis à haute température (> 400°C). Le laitier moulu limite le phénomène de réhydratation de la chaux, après refroidissement, dû à la décomposition de la Portlandite entre 450 et 550°C ;

- Une *réduction du risque de réaction alcali-silice réduite* : De par sa faible teneur en alcalins et sa perméabilité plus faible, le laitier moulu réduit, voire annihile ce type de réaction expansive. Il protège les armatures ;
- La *possibilité de former un béton à "bas carbone"*. Le remplacement de 50% de ciment Portland par du laitier vitrifié permet de réduire les émissions de CO₂ de 50%.

En France, la gamme de laitier moulu **ECOCEM** (Arcelor – site de Fos-sur-Mer) peut être mélangé jusqu'à 60 % à un ciment CEM I ou II pour former un équivalent CEM III.

Une alternative au ciment CEM III consiste à mélanger en centrale à béton (*et non en cimenterie*), le ciment CEM I et le laitier moulu en même temps que l'eau et les granulats. Cela offre l'avantage de pouvoir modifier le dosage du laitier en fonction de l'application souhaitée. Un taux compris entre 20 et 40% est généralement réalisé bien que des valeurs de 65 à 70 % existent pour certaines applications (*béton de masse, tuyaux de drainage préfabriqué, ...*). Cette technique est particulièrement bien développée en Angleterre.

b. Liant hydraulique routier

Le laitier vitrifié peut intervenir comme composé principal d'un liant hydraulique routier.

La société SGA (*filiale d'Eiffage et de Phoenix service*) a développé le Sidmix®, comprenant 40 à 44 % de laitier moulu en association avec 40 à 44 % de scorie classique finement broyé et 5 à 6% de gypse. Ce LHR convient pour les sols (*notamment crayeux*) et empièvements ainsi que pour des applications en remblai (*dosage compris entre 3 et 4 %*), en couche de forme (*5-7%*), en assise, voire en béton sec compacté (*9-12%*). Il présente un délai de maniabilité très long (*entre 5 et 9 h*) et un faible bilan carbone. Ses propriétés sont relativement variables selon la qualité des scories fournies et la difficulté de broyer finement les scories.

2.3.2.3 Routes et voies ferrées

Le laitier vitrifié frais est principalement utilisé comme liant hydraulique dans les empièvements de fondation routière (*depuis 1961 en France*) mais il peut être aussi utilisé comme sable (*application très rare et concerne principalement les vieux stocks*) pour autant qu'il respecte certains critères.

Tableau 2.VIII : Prescriptions d'utilisation du laitier granulé en domaine routier selon CCT QUALIROUTES.

Caractéristique	Emploi comme liant	Emploi comme sable
Conditions générales	Matériau homogène et pur (<i>pas de matière réfractaire, de sable naturel et d'argile</i>) Il ne peut être ni blanc, ni mousseux, ni riche en chaux	
Norme exigée	NBN EN 14227-2	NBN EN 13 242
Masse volumique sèche en vrac	> 0,7 t/m ³	> 1,0 t/m ³
Coefficient d'activité (α)	20 ≤ α < 40	20 ≤ α < 40

a. Fondation en empièchement lié

Le laitier moulu est utilisé comme liant d'un empièchement en présence d'un activant basique (*type chaux*). Son emploi rare, permet par rapport au ciment CEM I et III, 1) d'allonger le délai de mise en œuvre (*pratique si la centrale est loin du chantier*), 2) de faciliter l'obtention d'un bon profil de surface, 3) de durcir plus lentement et 4) d'ouvrir plus rapidement la voirie à la circulation (*capacité auto-réparatrice*).

REMARQUE : La combinaison laitier moulu – activant dispose d'une certaine *capacité auto-réparatrice* due à son durcissement plus lent. Ce mélange peut ainsi remplacer des liaisons rompues par de nouvelles pendant un certain temps. Cela permet aussi une adaptation du matériau à d'éventuelles déformations ultérieures du sol-support. Le matériau se comporte par la suite comme une structure rigide présentant un excellent pouvoir répartiteur.

Enfin, l'ajout de laitier sous forme de filler permet d'étaler la courbe granulométrique et de faciliter le compactage.

Plusieurs types de fondation utilisant ce type de laitier existent. Elles sont plus fréquentes en France mais tendent à disparaître, vu la faible quantité de matériaux disponibles.

Tableau 2.IX : Principales applications et caractéristiques des laitiers vitrifiés en fondation routière.

Caractéristiques	Empierrement traité au laitier Type I ou II C	Grave – laitier Grave hydraulique	Sable - laitier
Pays	Belgique	France	France
Granulats	0/20 (IC) ou 0/32 (IIC)	0/20 selon fuseau défini	0/6,3
Laitier			
Nature	Vitrifié granulé	Vitrifié (granulé, bouleté)	Vitrifié (granulé, bouleté)
Dosage	10 - 25 %	8 - 20 %	15 - 25 %
Activant basique			
Nature	Chaux	Chaux pure, chaux + gypse, cendres volantes, ciment	Chaux pure, Gypsonat, cendres volantes
Dosage	1 - 2 %	1 %	1 %

REMARQUE : Le pourcentage d'additif est exprimé par rapport à la masse des granulats secs.

- La *grave – laitier* ou *grave hydraulique* (France) peut utiliser du laitier non moulu comme liant. Dans ce cas, sa réactivité doit être déterminée pour atteindre certaines performances mécaniques. Le dosage en laitier varie entre 8 et 12 % (*laitier moulu*) et entre 10 et 20 % (*laitier non moulu*). Le laitier peut être utilisé comme grave (GLTL) et ne demande pas toujours d'activant puisque ce dernier est présent dans la grave mais la prise est nettement plus lente ;

Tableau 2.X - Performances mécaniques des graves – laitier selon une directive LCPC – SETRA.

Caractéristiques à 1 an	Rc (MPa)	Rt (MPa)	E _t (10 ³ MPa)
<i>Grave – laitier</i> (activants calcique ou sulfatocalcique)	7 - 15	≥ 0,65 (0,7 - 1,5)	≤ 20
<i>Grave – laitier prébroyé</i> (activants calcique ou sulfatocalcique)		≥ 0,80	≤ 25

- L'*empierrement traité au liant hydraulique routier* (LHR) n'est utilisée qu'en France.

REMARQUE : La France a développé dans les années 1970 (*crise du pétrole*), une grave-laitier à hautes performances (GLHP) située entre la grave-laitier classique et le béton sec compacté (*Rc compris entre 1,5 et 3 MPa*) en vue de remplacer la couche de roulement bitumineuse. Ce mélange faisait intervenir un dosage en liant ainsi qu'un coefficient d'activité plus élevés. Mais cette solution n'a pas connu de réel succès.

En pratique, le mélange est réalisé en centrale et son transport s'effectue par camion bâché. La mise en œuvre est interdite en présence de fortes pluies.

Les couches sont épandues mécaniquement en épaisseur uniforme comprise entre 8 et 15 cm (*voire 25 cm en France*). L'épaisseur totale varie entre 25 et 50 cm selon le trafic et la portance de la plateforme sous-jacente. Des essais à la plaque sont réalisés avant la prise du matériau (*généralement 4 h en Wallonie*). Une couche de protection contre la dessiccation est nécessaire, notamment sur sable-laitier (*évaporation superficielle plus rapide*).

2.3.2.4 Autres domaines du génie civil

a. Béton, mortier et coulis

Le laitier vitrifié peut intervenir dans un béton, soit comme sable, soit comme liant hydraulique (*laitier moulu*) pour autant qu'il respecte dans ce cas, la norme **EN 15167-1** (*Laitier granulé de haut-fourneau pour utilisation dans le béton, mortier et coulis – Partie 1 : définitions, exigences et critères de conformité*).

Le béton contenant du laitier vitrifié est principalement destiné à un milieu agressif (*alcalin, maritime ou riche en sulfates*) suite à ses bonnes résistances à l'alcali-réaction et aux sulfates.

Le présent chapitre reprend quelques exemples d'applications à base de ciment de laitier moulu :

- Le *tuyau d'assainissement* peut contenir entre 66 et 80 % de laitier moulu afin d'améliorer sa résistance aux attaques chimiques ;
- La *fondation et la structure d'un bâtiment d'étude de la fusion nucléaire* (TOKAMAK ITER – Saint-Paul-les Durance (13) : France). La substitution du ciment par plus de 40 % de laitier moulu a permis de réaliser des éléments d'épaisseur métrique en raison de sa faible chaleur d'hydratation ;

- La *fondation d'éolienne (France)* nécessite généralement une mise en œuvre d'une grande quantité de béton en peu de temps. La substitution du ciment par plus de 40 % de laitier moulu a été choisie en raison de sa faible chaleur d'hydratation ;
- Les *voussoirs du métro de Rennes (France)* sont composés à raison de 30% de laitier moulu en raison de leurs résistances aux attaques chimiques ;
- Un *immeuble de 135 m de haut (Marseille – France)* a été réalisé à partir d'un béton contenant 40% de laitier moulu comme ciment.

b. Amélioration des sols et fondations spéciales

Le laitier moulu peut être mélangé à la bentonite pour réaliser des fondations spéciales et la stabilisation de sols.

c. Traitement de matériaux biosourcés

Le laitier moulu améliore la résistance à la pénétration de l'eau, des moisissures et la réaction au feu de certains matériaux biosourcés (*chanvre, colza, ...*).

d. Brique de laitier

La brique de laitier créée en 1865 par l'Allemand *Lürmann (Osnabrück)*, se composait initialement d'un mélange laitier - chaux mais a subi par la suite, diverses adaptations (*substitution de la chaux par du ciment Portland et puis par du ciment de haut-fourneau*) pour finalement obtenir un produit satisfaisant et répondant à la norme allemande DIN 398. La composition actuelle est une part de ciment + 14 parts de laitier.

Le procédé de fabrication nécessite un durcissement accéléré du matériau en autoclave (*réduction du temps de prise et donc de fabrication*) tout en améliorant les caractéristiques de densité et de résistance. Elle répond aux autres critères d'une brique (*isolation, porosité, etc.*).

Tableau 2.XI : Principales caractéristiques de la brique de laitier.

Paramètre	Critère
Couleur	Gris terne clair à tendance jaune verdâtre à l'extérieur avec une cassure plutôt bleuâtre
Densité	1,4 - 2,2
Absorption d'eau	4 - 10 %
Résistance mécanique	5 - 30 MPa Croissante avec le temps (<i>une résistance de 25 MPa à la sortie de l'usine a été mesurée à 40 MPa quelques années plus tard</i>)
Dureté	Elevée (<i>inclouable</i>)
Résistance à l'usure	Elevée
Résistance aux agents chimiques (<i>eaux, matières organiques</i>)	Très bonne résistance vis-à-vis des eaux pures, des eaux séléniteuses et des matières organiques
Géivité	Très bonne (<i>due à la forme de la porosité</i>)
Conductibilité thermique (λ)	0,6 - 0,75 W/m.°K

Ce type de brique a été utilisée dans les applications suivantes :

- Les *ouvrages devant véhiculer les eaux pluviales, usées ou les effluents* : Le bon comportement de l'ouvrage nécessite l'emploi de mortier à base de ciment de haut-fourneau ;
- Certains *bâtiments agricoles (étables, écuries, ...)* soumis à des attaques acides (*excréments*) ;
- Les *cheminées* en raison de la bonne résistance à la chaleur ;
- Les *ouvrages où l'aspect extérieur n'est pas primordial* ;
- L'église Saint Charles de Marnaval (*Haute-Marne, France*)



Figure 2.2 : Eglise Saint Charles de Marnaval (Haute-Marne, France) réalisée uniquement en briques de laitier.

e. Laine de laitier

La laine de laitier est composée de 94% de laitier de haut-fourneau vitrifié et est similaire à la laine de roche (*basalte*).

2.3.2.5 Environnement

a. Inertage de sols pollués

Les sociétés Ecocem et Véolia étudient la possibilité de réaliser un ciment à base de laitier moulu comme liant de sols pollués.

b. Parois d'étanchéité de CET

Le laitier vitrifié se caractérise par une très faible perméabilité.

2.3.2.6 Autres

a. Agriculture

Le laitier vitrifié peut intervenir dans un fertilisant mixte (*amendement – engrais*) appliqué, soit directement, soit avec des engrais phosphatés ou potassiques.

b. Traitement des métaux

Le sable de laitier caractérisé par l'absence de silice libre peut se substituer au sable naturel pour le traitement de surface par grenailage des métaux en place.

c. Verre

Le laitier vitrifié est apprécié dans la fabrication du verre comme abondante source d'alumine et de silice. Cette utilisation est réservée aux laitiers les plus purs. Des précautions sont nécessaires pour éviter toute pollution (*gravats, poussière, ...*) pendant le stockage et le transport.

3. SCORIES D'ACIERIE OU LAITIERS D'ACIERIE

3.1 GENERALITES

3.1.1 Définition

Le terme "*scorie d'aciérie*" est un *terme belge désignant un sous-produit industriel issu de l'activité d'un convertisseur d'aciérie ou d'un four électrique*. La France utilise les termes de *laitier d'aciérie* ou de *laitier de convertisseur* pour ce type de sous-produit.

3.1.2 Classification

Une très grande diversité de scories d'aciérie existe selon la filière utilisée (*voir ci-dessus*). Toutefois, les principales scories valorisées en domaine routier sont :

- La *scorie classique* ou *scorie LD, LDA, BOF* est issue de la filière minerais (*convertisseur*) ;
- La *scorie électrique EAF* est issue d'un four électrique ;
- La *scorie inox* est issue d'un procédé particulier rendant le métal inoxydable.

3.2 CARACTERISATION

3.2.1 Aspect visuel

L'aspect visuel (*couleur, porosité, etc.*) varie d'une scorie à l'autre selon sa composition chimique et ses modes de production et de refroidissement. Il est donc difficile d'établir des spécificités visuelles pour chaque scorie. Toutefois, les principes suivantes peuvent être cités :

- La *couleur* d'un grand nombre de scorie varie entre gris clair (*scories EAF et inox*) et gris noir à brun foncé (*scorie classique*). Cela dépend notamment de la teneur en chaux (*couleur claire*) et en oxydes de fer (*couleur brune*) ainsi que du refroidissement lent (*couleur sombre*) ;
- La *porosité* est relativement variable selon la présence ou pas d'un arrosage à l'eau lors des premières heures de refroidissement ;
- La *densité* (> 3) est légèrement plus élevée que celle d'un granulat classique et du laitier de haut-fourneau ;
- La *texture* d'une scorie classique est relativement bien cristallisée alors que les scories issues de processus particuliers (*AOD et de poche*) ont tendance à être pulvérulentes si elles ne sont pas traitées, notamment par ajout d'oxyde de bore juste avant le refroidissement.

3.2.2 Composition chimique

3.2.2.1 Composition générale

Tableau 3.I : Composition moyenne des scories (source : Sétra 2012).

Composant	Scorie classique	Scorie EAF	Scorie inox
pH	11 - 13		
CaO (%)	40 - 60	25 - 45	25 - 55
Chaux libre	1 - 20	0,2 - 1	0,5 - 3,5
MgO (%)	1 - 8	3 - 10	3 - 15
SiO ₂ (%)	10 - 16	13 - 25	20 - 32
Fe ₂ O ₃ (%)	5 - 13	---	---
FeO (%)	10 - 25	25 - 45	1 - 10
Al ₂ O ₃ (%)	1 - 5	5 - 13	1 - 10
P ₂ O ₅ (%)	0,5 - 3	0,2 - 1	---
MnO (%)	1,8 - 3	3 - 8	1 - 5
Cr ₂ O ₃ (%)	---	1 - 3	1 - 15
F Total	---	2	1 - 5
TiO ₂	---	---	0,5 - 2

REMARQUE : Les composants sont généralement mentionnés sous forme d'oxydes. Toutefois, cela ne signifie pas que le composé est présent sous cette forme (*par exemple, le fer peut être présent sous différentes formes comme Fe, Fe²⁺, Fe³⁺*). Généralement, ces composés se trouvent sous forme de sels.

Bien que la composition chimique d'une scorie dépende principalement de la matière première (*minerai ou ferrailles*) et de la filière utilisée, le matériau contient principalement des silicates, des oxydes métalliques (*certaine densité*), des aluminates, de la chaux (*milieu basique*) ainsi que de la dolomie.

La scorie classique contient généralement beaucoup de chaux et de magnésie car ces éléments purifient l'acier (*Si, Al et K*). Une partie de ces éléments demeurent sous leurs formes libres : chaux vive (*CaO*), brucite ou périglaase (*MgO*). Ces formes sont responsables de phénomène de gonflement par hydratation. Cependant, cette propriété peut être un atout pour une scorie finement broyée qui développe une hydraulicité suffisante pour traiter certains sols.

La valeur élevée du pH est à mettre en relation avec la teneur relativement élevée en chaux libre.

3.2.2.2 Composition minéralogique

La composition minéralogique varie légèrement selon le type de scorie et le processus de production (*température et vitesse de refroidissement*). Le tableau ci-dessous reprend quelques minéraux fréquents.

Tableau 3.II : Liste des principaux minéraux présents dans les scories (*source : Bru (2019)*).

Scorie classique	Scorie EAF	Scorie inox
<ul style="list-style-type: none"> ● Silicates de calcium : <i>Alite (CaSiO₅) et larnite (CaSiO₄)</i> ● Oxydes de fer : <i>Wustite (FeO)</i> ● Ca : <i>Portlandite (Ca(OH)₂) + chaux vive + calcite</i> ● <i>Brownmillerite (Ca(Al Fe)₂ O₅)</i> 	<ul style="list-style-type: none"> ● Silicates de calcium : <i>Larnite et gehlenite</i> ● Oxydes de fer : <i>Wustite</i> ● Spinelles contenant du chrome 	<ul style="list-style-type: none"> ● Silicates de calcium : <i>Gehlenite et cuspidine</i> ● Calcite ● Spinelles contenant du chrome

3.2.3 Caractéristiques environnementales

En Wallonie, la scorie classique et la scorie électrique sont considérées comme un déchet inerte (*code 10 02 02 - Laitiers non traités*).

REMARQUE : En France, les laitiers d'aciérie sont classés en fonction du site de production, sous les codes 10 02 01 (*déchets de laitiers de hauts-fourneaux et d'aciéries*) ou 10 02 02 (*laitiers non traités*). D'autre part, pour pouvoir être appliqué en domaine routier, le laitier doit respecter les exigences reprises dans le guide Sétra d'acceptabilité environnementale de matériaux alternatifs en technique routière : Les laitiers sidérurgiques.

Les scories d'aciérie se caractérisent par trois aspects environnementaux spécifiques :

- **Le caractère basique de la scorie** dû à la présence de chaux et de magnésie nécessite une attention particulière en cas d'utilisation en immersion ou de contact avec certaines matières (*sol, etc.*). Le changement de pH peut libérer certains métaux lourds présents dans la scorie, voire une grande quantité d'ions Ca²⁺ (*carbonatation et réduction de la perméabilité*) ou attaquer le matériau encaissant ;
- **La présence de quelques métaux lourds ou éléments traces métalliques** (ETM) comme :
 - *Le baryum* est souvent l'élément le plus abondant dans les essais de percolation et de lixiviation, dépassant parfois les valeurs-seuils ;
 - *Le chrome* est assez abondant dans la scorie inox et peut être assez présent dans la scorie EAF. Il est présent dans des phases minérales stables riches en fer comme la wustite (*FeO*) ou la magnétite (*après altération*) et plus faiblement les ferrites de calcium ;
 - *Le cuivre* peut être abondant dans certaines scories ;
 - *Le vanadium* est également principalement présent dans les phases minérales stables riches en fer comme les ferrites de calcium et partiellement les silicates de calcium.

REMARQUE : Quelques projets de recherche (*ECLAIR en France et SESAR en Europe*) ont permis de mieux comprendre les différents échanges complexes entre le sol et les scories en fonction du pH.

- Le *fluor* est un élément à surveiller ;
- **Une bonne compatibilité avec les cultures dites "biologiques"** en utilisation agricole (*amendement calcique, engrais, ...*).

3.2.4 Caractéristiques géotechniques
3.2.4.1 Essais classiques

Les principales caractéristiques géotechniques des scories d'aciérie sont reprises ci-dessous.

Tableau 3.III : Principaux paramètres géomécaniques des scories d'aciérie.

Caractéristiques	Scorie classique	Scorie électrique	Scorie inox	Commentaires
Paramètres géométriques <i>Courbe granulométrique</i> <i>Teneur en fines (f)</i> <i>Qualité des fines (MB)</i> <i>Forme des grains (Flx)</i> <i>Arêtes des grains</i>	Fonction de l'installation de traitement			Valeurs constantes pour une installation donnée
	Valeurs généralement faibles			Processus thermiques
	Grains cubiques et rectangulaires			Formes plus cubiques que le porphyre et calcaire
	Anguleuses			Moins de 2 % d'éléments longs et plats
Paramètres physiques (gr/cm³) <i>Masse volumique absolue</i> <i>Masse volumique réelle sur scorie fraîche</i> <i>Masse volumique réelle sur scorie mature</i> <i>Masse volumique en vrac ou apparente</i> <i>Coefficient d'absorption (%)</i>	3,0 – 3,9	3,5		La maturation augmente la densité
	2,7 – 3,1	3,0 – 3,5		Valeurs plus élevées que les granulats naturels ⇒ Transport et manipulation
	2,9 – 3,2			Faible à moyenne porosité
	1,9 – 2,1	1,9 – 3,9		
	1 - 3	1 - 3		
Paramètres chimiques <i>Teneur en matières organiques</i> <i>Teneur en soufre et sulfates</i>	Faible			Processus thermiques
	Variable			Prudence en cas d'application liée
Paramètres de durabilité mécanique <i>Essai Micro-Deval (MDE – attrition)</i> <i>Essai Los Angeles (LA – fragmentation)</i> <i>Coefficient polissage accéléré (CPA – usure)</i>	3 - 14	3 - 8	5 - 7	Excellente résistance à l'attrition
	4 - 25	9 - 36	13 - 14	Dispersion due à la teneur en Si et Mg
	60 - 70	45 - 70	45 - 70	Voir remarque ci-dessous
Paramètres de durabilité climatique <i>Sensibilité au gel – dégel</i> <i>Essai au sulfate de magnésium</i>		1		Essai à réaliser si le coefficient d'absorption > 1,5 ou 2 %
Essai Proctor <i>Teneur en eau optimale OPN (%)</i> <i>Masse volumique sèche OPN (g/cm³)</i> <i>Teneur en eau optimale OPM (%)</i> <i>Masse volumique sèche OPM (g/cm³)</i>	9,5			
	2,235			
	9,0			
	2,345			

REMARQUE : La valeur de *résistance au polissage accélérée* est influencée par le mode de déversement des scories sortant du four. Un déversement en fines couches (< 10 cm) présente une plus faible résistance due au fait que la proportion de grains ayant des surfaces de refroidissement lisses et non cassées est plus importante. De plus, l'essai CPA n'est pas totalement représentatif du comportement de la scorie. La méthode développée chez Sagrex (*Quenast*) qui consiste à réaliser des plaquettes sans sélectionner les pierres et pratiquer une usure avec du sable, semble être plus représentative du comportement d'usure.

3.2.4.2 Problèmes et essais spécifiques

Outre un problème de teneur relativement élevée en chrome dans la scorie inox, le principal problème d'une scorie classique et de façon moindre, d'une scorie électrique est son risque de gonflement ponctuel par hydratation expansive de la chaux libre ou de la magnésie au contact de l'eau.

a. Explication du problème de gonflement

La scorie classique non mature peut présenter un gonflement ponctuel qui apparaît souvent plusieurs mois, voire plusieurs années après sa mise en place et provoque d'importantes déformations dans la voirie. Le phénomène peut également apparaître lors d'une rénovation de voirie en conditions pluvieuses. Le gonflement est d'autant plus important que la granulométrie est fine.

Quelques expériences malheureuses ont permis de mieux comprendre le mécanisme de gonflement afin d'élaborer des méthodes d'essais spécifiques et des critères spécifiques.



Figure 3.1 : Exemples de gonflements de scorie dû à la présence de chaux ou de magnésie.

Bien que présente sous une forme cubique stable due à sa température élevée de formation ($> 1\ 150^{\circ}\text{C}$), les particules micrométriques à centimétriques de chaux vive (CaO) réagissent très lentement à l'eau pour s'hydrater en hydroxyde de calcium ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) qui est plus volumineux (+ 93 %). Ce phénomène se caractérise par l'effritement du grain jusqu'à sa transformation en poudre (*foisonnement*), un dégagement de chaleur (*réactions exothermiques*) mais surtout par la présence de gonflement et de fissure qui déstructure l'ensemble de la structure.

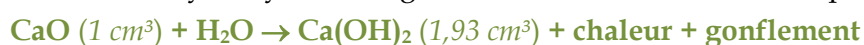
Ce gonflement peut également apparaître sous forme d'une succession de lignes bombées transversales et équidistantes de 3 à 5 m. En effet, la *dilatation linéaire minimale* (ε_1) équivaut à $\pm 1/3$ du *pourcentage de chaux libre contenu dans la couche*. Ainsi, pour une couche de scorie caractérisée par une teneur en chaux libre de 3 %, une épaisseur de 25 cm et une largeur de 6 m, la dilation linéaire minimale sera de 2,5 mm verticalement, 6 cm latéralement et de 1 m par tronçon de 100 m. Cette dernière déformation explique le développement de ces lignes bombées, vu que cette zone de gonflement se trouve bloquée entre deux zones rigides. Le phénomène est moins visible latéralement car les abords sont généralement en terre et peuvent donc mieux dissiper les contraintes.

De plus, l'apparition de fissures en surface favorise la pénétration de l'eau et accélère le processus de gonflement.

REMARQUE : Le phénomène est peu sensible à l'action de l'eau de refroidissement, vu la forme relativement stable à haute température et l'effet immédiat de l'arrosage.

Dans certains cas (*venue de CO_2*), l'hydroxyde peut se transformer en calcite (+114 % du volume de CaO).

Un phénomène similaire peut se présenter en présence de magnésie ou périclase (MgO) avec un gonflement de 100 % lors de la formation en hydroxyde de magnésie, la brucite. La réaction est plus lente.



REMARQUE : La réaction de transformation de la chaux vive est la réaction principale pour le traitement des sols à la chaux vive. C'est pourquoi les éléments fins de scorie ($D_{\text{max}} \leq 10 \text{ mm}$) peuvent être utilisés comme liant.

A un degré moindre, d'autres espèces minérales présentes dans la scorie comme l'oxyde de fer (*transformation en rouille*), certains silicates bicalciques ou tricalciques (*orthosilicates de chaux de forme allotropique $\beta - 2 \text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ ou $\text{C}_2\text{S}\beta = \text{structure instable}$*) et des cristaux mixtes à base de calcium peuvent également s'hydrater et donner naissance à un gonflement, certes minoritaire mais participant à l'expansion globale du matériau.

Lors de la maturation, se développe une fine pellicule d'altération en bordure du grain qui se caractérise par la dissolution des minéraux primaires et l'apparition de phases secondaires (*calcite, portlandite, hydrates de calcium et d'aluminium C-S-H*) pour former une structure minéralogique encore plus complexe. Dans ce contexte, la wustite se dissout partiellement et donne lieu à de la brucite ($\text{Mg}(\text{OH})_2$) et à une phase de type spinelle (*magnétite*) piégeant la chromite.

b. Essais spécifiques pour évaluer le risque de gonflement

Plusieurs essais permettent de déterminer la teneur en chaux ou magnésie libre et ainsi de prévoir le risque de gonflement.

b.1 Essai de potentiel de gonflement accéléré à la vapeur d'eau (CME 01.12 a partie 1 - $D_{max} \leq 25$ mm)

L'essai consiste à réaliser deux éprouvettes (\varnothing 210 mm) d'un fuseau granulométrique 0/25 bien défini (courbe de Fuller) compactées en trois couches à énergie Proctor et surmontées d'un dispositif composé de microbilles (meilleure répartition des charges), d'un plateau en acier (surpoids du revêtement) et d'un dispositif de mesure. Ces éprouvettes sont par la suite, soumises à l'action de la vapeur d'eau (100 à 110°C selon la méthode) riche en sels, durant 1 (calcium) à 7 jours (si plus de 5 % de magnésium). Le gonflement volumique est mesuré en continu.

REMARQUE : Dans le cas où il n'est pas possible de réaliser la courbe de Fuller, un matériau neutre est ajouté selon une certaine proportion et le gonflement final doit être rapporté à la teneur en scorie de l'échantillon, tout en tenant compte de la densité plus importante des scories.

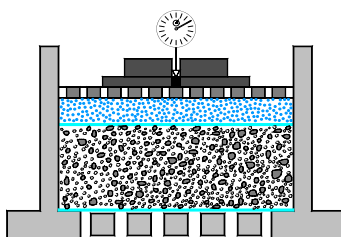


Figure 3.2 : Vue et schéma du dispositif de l'essai de gonflement accéléré.

REMARQUE : La méthode initialement conçue au CRR (MF 67/93) prévoyait une température de 50°C plutôt que de 100°C et la présence d'une couche de sable au sommet plutôt que des microbilles.

Les courbes du graphe gonflement – temps montrent la présence de 2 phénomènes et permettent de déterminer l'origine de la scorie :

- Un **gonflement volumique rapide** (endéans les 24 premières heures) traduit la présence de CaO. Cela est caractéristique d'une scorie classique ;
- Un **gonflement volumique sur 7 jours** caractérise la présence de MgO dans la scorie qui provient généralement d'une filière électrique (scorie EAF).

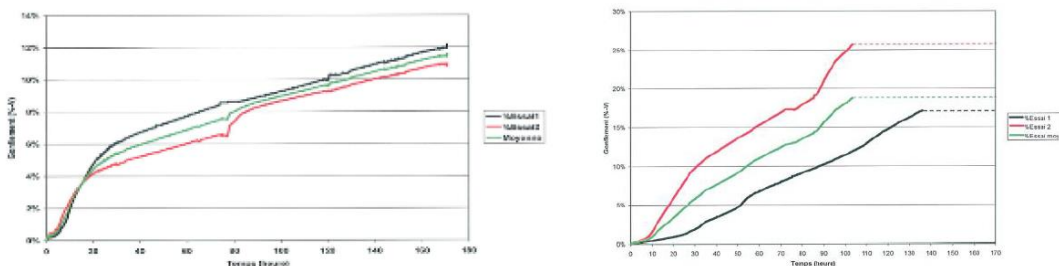


Figure 3.3 : Exemples de graphes de gonflement volumique en fonction du temps. A gauche, cas d'une scorie classique. A droite, cas d'une scorie EAF.

Le **gonflement volumique** est directement proportionnel à la teneur en CaO libre non hydraté (3% de CaO libre correspond à un gonflement volumique potentiel de 3 % pour ce qui est de l'hydratation et 3,69 % s'il y a le processus de carbonatation) et à la teneur en magnésie libre.

REMARQUE : Cependant, il n'existe pas de relation évidente entre l'essai de potentiel de gonflement accéléré à la vapeur d'eau et la teneur en CaO libre mesurée soit par analyse diffractométrique, soit par l'essai de teneur en chaux libre, vu la très faible quantité de matière utilisée pour ces derniers essais.

Les valeurs sont très variables et ponctuelles à cause de la répartition hétérogène des nodules de chaux libre. Le critère de référence en Wallonie est généralement égal à 3 % pour une application en sous-fondation et fondation et égal à 3,5 % pour un enrobé hydrocarboné. En Europe, le critère général est de 5 %. En France, le critère équivaut à 3,5 % pour une couche de roulement et 5 % pour les couches d'assise et de forme.

REMARQUE : Des valeurs de 20 à 30 % de gonflement ont été mesurées sur des chantiers présentant déjà d'importants phénomènes de gonflement.

De grandes variabilités existent d'un échantillon à l'autre. Le coefficient de variation (écart-type divisé par la valeur moyenne exprimé en pour-cent) peut facilement dépasser 30 %. Ainsi, si dans l'interprétation, c'est la

valeur moyenne qui est comparée à la valeur critère, le CRR indique toutefois dans sa méthode d'essai (*paragraphe non repris dans le CME wallon*) que l'**essai doit être recommencé** si une des deux valeurs individuelles dépasse de 1,3 fois la valeur critère, soit 3,9 % dans le cas du critère pour sous-fondation et fondation et 4,55 % pour le critère en revêtement.

b.2 Stabilité volumique des scories d'aciérie (EN 1744-1 §19.3)

L'essai est similaire à l'essai précédent.

Les valeurs sont généralement comprises entre 1 et 20 %.

b.3 Méthode CRR du gonflement (CME 01.12 B)

Le CRR a développé une méthode de mesure de la dilatation linéaire d'une éprouvette cylindrique à partir d'un échantillon à examiner en fonction du temps (*durée de 28 jours*) et sous immersion dans l'eau à 50°C.

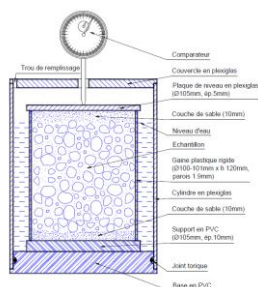


Figure 3.4 : Schéma de l'essai selon la méthode CRR de gonflement (Source : CME).

Le critère préconisé avec cette méthode est de 1 % pour les scories LD après 28 jours. Pour une application en béton maigre, le critère est ramené à 0,5 %.

Cette méthode n'a pas été retenue par les régions pour les scories (*délai trop long*) mais a été adoptée pour les matériaux artificiels et recyclés autres que les scories EAF et LD (CME 01.11). Pour ces matériaux, ce n'est pas l'hydratation de la chaux vive qui est responsable du gonflement mais bien l'apparition d'ettringite secondaire à partir de sulfates.

REMARQUE : Le schéma montre en réalité un faible contact entre l'échantillon et l'eau. Cette méthode n'est donc pas nécessairement représentative des différents comportements de gonflement.

b.4 Essai de délitement ($D_{max} > 25 \text{ mm}$: CME 01-011 ou CRR - MF 67/93)

Etant donné que le gonflement de la chaux provoque des fissures et décompose les éléments grossiers en éléments plus fins et que les éléments de diamètre supérieur à 25 mm ne peuvent rentrer dans la courbe de Fuller, l'essai de délitement s'applique à la fraction grossière du granulat ($\varnothing > 25 \text{ mm}$)

Il consiste à déterminer la perte de poids de cette fraction refusée initialement au tamis de 25 mm (M_1) après immersion dans l'eau à 50°C pendant 14 jours et passage (*à l'eau et à sec*) au tamis de 20 mm (M_2).

La pourcentage de délitement équivaut à
$$\frac{(M_1 - M_2) \cdot 100}{M_1}$$

L'essai est réalisé sur 3 échantillons et la valeur moyenne est comparée à une valeur critère.

Le critère généralement adopté dans les cahiers des charges équivaut à 1,5 %. Dans le passé, ce critère valait 3 % ; ce qui correspondait à un taux de chaux libre de 2,5 % en production selon le graphe ci-dessous.

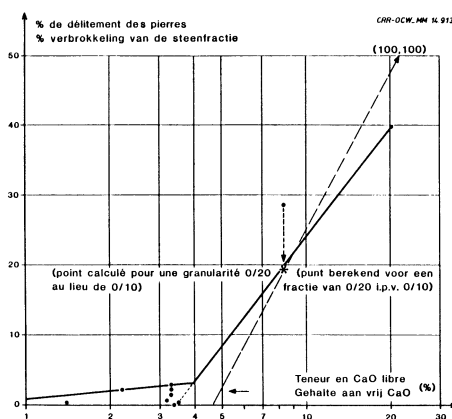


Figure 3.5 – Graphe teneur en CaO libre à la production - % de délitement des pierres (Source : CRR).

De grandes variabilités existent d'un échantillon à l'autre. Le coefficient de variation (*écart-type divisé par la valeur moyenne exprimé en pour-cent*) peut facilement dépasser 30 %. Ainsi, si dans l'interprétation, c'est la valeur moyenne qui est comparée à la valeur critère, le CRR indique toutefois dans sa méthode d'essai (*paragraphe non repris dans le CME wallon*) que **l'essai doit être recommencé** si une des trois valeurs individuelles dépasse de 0,5 %, la valeur critère, soit 1,507 % dans le cas du critère pour remblai.

b.5 Teneur en chaux libre

La teneur en chaux libre peut être obtenue par diverses méthodes (*méthode Leduc ou analyse diffractométrique*). Le critère généralement admis dans les cahiers des charges est généralement compris entre 4 et 5 %.

REMARQUE : Ce test ne permet cependant pas de déterminer s'il y a un risque de gonflement ou pas.

Bien que cette valeur ne soit pas représentative d'un gonflement potentiel, le CRR (*Belgique*) a formulé deux indices qui sont rarement utilisés de nos jours :

- L'**indice d'instabilité (i)** (*Verhasselt - 1991*) est basé sur la teneur en chaux libre et la dimension granulométrique moyenne (D_{50}). Il ne doit pas dépasser 2 selon l'utilisation.

$$I = \frac{\%_{\text{CaO}} \cdot 10^3}{D_{50}^3}$$

- L'**indice de mûrissement (IM)** permet de déterminer le niveau de maturation d'une scorie au sein d'un stock en cours d'hydratation et de carbonatation. Il équivaut à la formule suivante :

$$IM = 100 \left(1 - \frac{\text{CaO}_r - \text{CaO}_\infty}{\text{CaO}_i - \text{CaO}_\infty} \right)$$

Avec CaO_r : Teneur résiduelle en CaO libre non hydraté

CaO_i : Teneur initiale en chaux libre

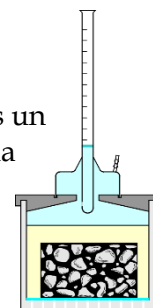
CaO_∞ : teneur résiduelle limite en CaO libre non hydraté (0,5%)

b.6 Essai en logette (*CME 01.12 a partie 2 – granulats pour revêtement bitumineux*)

L'essai sert à évaluer l'aptitude de la scorie à être utilisée dans une couche asphaltique.

Il consiste à immerger une éprouvette de fluage Marshall contenant un vide de 6 Vol-% dans un bain-marie à 40°C pour permettre un apport constant d'eau vaporisé à la chaux libre et à la magnésie libre. Le gonflement est mesuré pendant l'immersion.

La valeur ne doit pas être supérieure à 1% pour une application en couche de surface et à 2,5% pour une sous-couche.



b.7 Essais particuliers d'Eurogranulats (*France*)

La société Eurogranulats réalise deux types d'essais particuliers selon la granulométrie concernée.

- La **mesure du taux d'expansion** ($D \leq 20 \text{ mm}$) est une variante de l'essai de potentiel de gonflement accéléré puisque l'échantillon est immergé dans un bain d'eau chaude à 60°C ;
- L'**essai de détérioration des gravillons en autoclave** ($D \leq 20 \text{ mm}$) consiste à étudier le comportement du matériau après passage dans une autoclave (*pression et températures élevées*) selon un mode opératoire spécifique à la société.

b.8 Test à la lumière UV

Ce test simple consiste à éclairer l'échantillon à la lampe UV et à détecter la présence de scorie fraîche ou suspecte vis-à-vis de la désintégration du silicate calcique.

La scorie LD est considérée comme stable si elle présente une coloration violette uniforme et ne montre que des tâches brillantes en faible quantité et uniformément distribuées.

c. Solutions pour réduire le risque de gonflement des scories

Plusieurs solutions permettent de réduire ce risque :

- L'**hydratation naturelle** ou **maturation des scories** est lente (*durée de plusieurs semaines à quelques années*) et exige d'importantes surfaces de stockage. Le délai augmente avec la teneur en CaO libre et la granulométrie. L'**indice de mûrissement (IM)** permet de suivre l'hydratation ;
- Le **vieillessement accéléré des scories** consiste à arroser et brasser la scorie disposée en tas mince (*Fos-sur-Mer, Brésil*), à injecter de la vapeur dans le tas (*Japon*) ou à les introduire en autoclave (*Hollande*) afin d'accélérer les réactions d'hydratation. Ces techniques nécessitent souvent d'importantes quantités d'énergie ;

REMARQUE : Le processus de maturation établi sur le site de Fos-sur-Mer (*Arcelor-Mittal*) consiste à réaliser des couches de 40 cm d'épaisseur maximum, arrosées 3 x 2 h/jour et remuées une fois par semaine durant 3 mois.

- La *neutralisation d'une partie de la chaux et de la magnésie à la source* (scorie liquide) par injection de sable siliceux (*formation de silice bicalcique*) et d'oxygène (*procédé THYSSEN d'Arcelor – Allemagne*), de grésil de verre (*projet belge Eteusce*) ou encore des sels acides. Cela permet de réduire très fortement le gonflement. Le produit d'Arcelor dénommé **LD-Grind** contient moins de 1% de chaux libre (*voir tableau ci-dessous*). Les résultats sont moins probants avec le grésil de verre qui contient du borate qui stabilise moins bien le silicate bicalcique et nécessite une valorisation liée ;

Tableau 3.IV : Analyse comparative entre une scorie LD classique et le produit LD-Grind (Arcelor).

Composition	Scorie LD classique	LD-Grind
CaO	53,4	43,3
CaO libre	13,3	0,7
SiO ₂	11,3	25,9
Fe	19,9	19,9

- L'*insertion d'une couche de sable* d'une dizaine de cm (*fonction de l'épaisseur de la couche de scorie*) entre 2 couches de scories permet de reprendre les éventuelles contraintes liées au gonflement ;
- Le *mélange de scorie fraîche (pas de maturation) avec un granulats inerte* en optimisant la répartition granulométrique (*courbe de Fuller*) de façon à absorber l'expansion de la scorie dans les vides. Les premières études montrent qu'un mélange 40% fines 0/10 de scorie LD - 60% pierres inertes 10/20 (*calcaire, laitier de haut-fourneau cristallisé*) offre un gonflement inférieur à 2% (*Rayssac et co, 2009*). La valeur de 5% de gonflement telle qu'autorisée en France pour une couche d'assise ou de forme serait atteinte pour une substitution de 60%. Cependant, les auteurs n'ont pas regardé les autres caractéristiques du matériau.
- Un *mélange 25% scorie LD (0/20) – 75% sable naturel* n'a pas montré de véritable effet d'hydraulicité ;
- Un *mélange scorie LD – laitier de haut-fourneau* a montré le développement de réactions pouzzolaniques qui stabilisent les scories et limitent le gonflement ;
- Un *mélange scorie LD – mâchefer d'incinérateur d'ordures ménagères (CRM - 1998)* a montré, via une planche d'essais réalisée sur une portion de voirie à trafic lourd du site de Sidmar, une forte réduction du risque de gonflement, le développement de meilleures résistances mécaniques à terme (*activation des propriétés pouzzolaniques latentes du mâchefer par la chaux contenue dans la scorie*) ainsi qu'une forte réduction de la lixiviation des chlorures et sulfates contenus dans le mâchefer (*rapport de 5 à 15*). Le mélange a pu être mis en œuvre avec des méthodes classiques de malaxage et de compactage ;
- L'*intervention sur le matériau en fusion* : Il est possible en cours de fusion, de réaliser des mesures de réflectance spectrale (*fluorescence aux rayons X*) afin de déterminer la composition des scories et de l'acier et ainsi de mieux doser les additifs.

Lors de travaux de rénovation de voirie, il est fréquent de trouver une scories ayant déjà gonflée. La solution la plus sûre consiste tout simplement à l'évacuer sauf si l'essai de potentiel de gonflement accélérée montre des valeurs très faibles de gonflement. Mais le risque demeure, vu la vitesse très lente du phénomène. De plus, il faut travailler par petites sections et en période sèche.

3.3 VALORISATION MATIERE

La majorité des scories fraîches maturées de tout type sont valorisées en domaine routier (*revêtement, fondation, sous-fondation et traitement des sols*) et ferroviaire (*ballast*). Leur emploi est régi par un certain nombre de normes (*EN 15167, ASTM C 989-95, etc.*). D'autres applications moins fréquentes existent. Toutefois, les applications peuvent varier d'une scorie à l'autre.

Les stocks historiques sont plus difficiles à valoriser.

3.3.1 Scories classiques (LD, LDA et BOF) et électrique (EAF)

REMARQUE : Les scories classiques et la scorie électrique sont considérées de la même façon dans les cahiers des charges. C'est la raison pour laquelle elles sont regroupées dans ce chapitre. Les quelques différences sont citées.

Ces scories ne sont pratiquement plus produites en Belgique, suite à la fermeture des aciéries classiques et électriques. Seuls, restent des stocks historiques qui demeurent plus difficiles à valoriser.

3.3.1.1 Avantages et inconvénients principaux

Tableau 3.V : Avantages et inconvénients des scories classiques et électriques.

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> ● <i>Forme cubique et arêtes anguleuses des grains</i> permettant d'obtenir une bonne compacité et une bonne résistance à la compression (<i>application liée</i>), moyennant une énergie élevée de compactage. ● <i>Densité élevée</i> permettant une valorisation en applications "pesantes" (<i>poids-masque, etc.</i>). ● <i>Excellentes résistances à l'attrition (MDE), à la fragmentation (LA) et au polissage (CPA).</i> ● <i>Excellente compatibilité et adhérence avec tout type de liant</i> (<i>chaux, ciment, LHR, bitume</i>) du fait de sa nature basique et sa structure micro poreuse. ● <i>Excellente résistance au dérapage et désenrobage ainsi qu'un bon comportement Marshall pour la scorie classique</i> ⇒ Revêtement bitumineux ● <i>Présence de chaux libre</i> ⇒ Traitement de sol ou substitution au ciment ● <i>Pas de risque de pollution par lixiviation</i> (<i>scorie électrique</i>). Il faut être prudent pour des applications en immersion, vu la basicité de la scorie. 	<ul style="list-style-type: none"> ● <i>Difficulté de compactage</i> due à l'angularité des grains. La difficulté est proportionnelle au diamètre des grains ● <i>Densité plus élevée</i> que les granulats naturels ⇒ Coût plus élevé de transport et béton plus dense. ● <i>Porosité généralement plus importante</i> (<i>scorie classique</i>) ⇒ Plus sensible au gel-dégel et teneur en liant plus importante. ● <i>Risque de gonflement ponctuel</i> dû à la présence de chaux et magnésie libre. ● <i>Absence de propriétés hydrauliques et pouzzolaniques</i>, même en présence d'un activant ⇒ pas d'application comme liant mais uniquement application comme granulat.

3.3.1.2 Routes et voies ferrées

La scorie classique et la scorie électrique peuvent être utilisées en Wallonie sous forme de sable, de gravillon ou de grave, moyennant le respect des critères généraux du C.4.3.4.2 du CCT QUALIROUTES.

Tableau 3.VI : Critères généraux d'application des scories classiques et électriques en Wallonie (CCT QUALIROUTES 2020).

Caractéristique	Prescription	Commentaires
Teneur en chaux libre (%)	≤ 5	Au moment de la production, après concassage et déferrisation
Gonflement (%)	Variable selon application	Si D ≤ 31,5 mm
Délitement (%)	≤ 1,5	Si D > 31,5 mm

De plus, la région Wallonne demande la mise à jour d'une comptabilité pour ces scories classées 10 02 02 selon l'AGW du 14 juin 2001 favorisant la valorisation de certains déchets.

Elles peuvent être utilisées dans les applications suivantes, moyennant le respect des critères spécifiques à ces applications. Les domaines d'applications sont plus stricts pour un sable.

Tableau 3.VII : Domaines d'applications des scories classiques en Wallonie (CCT QUALIROUTES 2020), moyennant le respect des critères spécifiques à ces applications.

	Revêtement		Fondation					Sous-fondation	Drainage	Remblai
	Hydro-carboné	Béton	Grave-bitume	Béton maigre + BSC	Sable-ciment	Empierrement lié	Empierrement non lié	Empierrement non lié		
Sable	Oui	Non	Oui	Non	Non	Non	Non	Non	Non	Oui
Gravillon	Oui	Non	Oui	Non	---	Oui (≤ 3 %)	Oui (≤ 3 %)	Oui (≤ 3 %)	---	Oui
Grave			(≤ 3,5 %)							

REMARQUE : Le chiffre entre parenthèses correspond au critère de gonflement imposé pour l'application.

La Wallonne autorise également l'application de la fraction fine ($D \leq 10 \text{ mm}$) appelé *fines de scorie* comme liant dans le traitement de sol.

a. Revêtement

a.1 Revêtement bitumineux

En raison de ses arêtes anguleuses, son excellente résistance au polissage et ses bonnes propriétés vis-à-vis du liant bitumineux, la scorie classique et la scorie EAF sont particulièrement valorisées dans les applications suivantes :

- *Revêtement bitumineux pour applications particulières* comme des zones de trafic intense, de virage ou de décélération. La scorie classique est également appréciée pour sa propriété à réduire le bruit suite à la présence d'une microporosité. La scorie électrique est moins performante à ce sujet ;

REMARQUE : La société italienne Italgrip a développé un granulat de scorie enrobé d'une fine couche de liant époxy qui convient pour des sections où les résistances à l'usure et à l'altération sont très élevées.

- *Enrobé drainant* : Une étude menée en Espagne (*Burgos*) sur un enrobé drainant à base de scorie grossière EAF et de scorie fine LD a révélé une bonne perméabilité et une texture plus rugueuse. Ces conditions conviennent pour des zones très pluvieuses. D'autre part, une étude chinoise sur un enrobé drainant à base de scorie non précisée a montré une réduction de la déformation permanente.

Toutefois, leur valorisation nécessite quelques étapes particulières :

- La *composition du mélange* doit être adaptée, étant donné sa masse volumique plus élevée par rapport aux granulats classiques et sa porosité plus élevée. Une modification de la courbe granulométrique et du type de liant permet d'obtenir des résultats similaires à ceux d'un mélange classique ;
- Le *compactage de la couche est plus difficile à réaliser* , vu la rugosité et l'angularité des grains ainsi que la porosité supérieure influençant l'adhésion granulats - bitume (*lubrifiant*). Le mélange compacté se caractérise dès lors par une teneur en vide comprise entre 8 et 10 % alors que le critère souvent exigé est $\leq 5 \%$. Pour pallier cela, un ajout supplémentaire (+0,5%) de liant ou de filler permet de combler les trous. Toutefois, certains vides ne sont pas comblés. La teneur en vide résiduelle peut être alors déterminée en comparant la masse volumique obtenue par immersion de l'échantillon à l'eau sous vide et la masse volumique obtenue par immersion dans du trichloéthylène (*solubilisant du bitume*), cette dernière valeur fournissant la masse volumique maximale du mélange ;
- La *rugosité* doit être vérifiée à terme : La scorie devient plus rugueuse après avoir séjourné dans l'eau. Cela est dû à la formation des oxydes de fer, de la chaux hydratée et de gel CS. Toutefois, elle devient également plus facilement décomposable. De plus, l'essai CPA n'est pas totalement représentatif du comportement de la scorie. La méthode développée chez Sagrex (*Quenast*) qui consiste à réaliser des plaquettes sans sélectionner les pierres et à pratiquer une usure avec du sable, semble être plus représentative du comportement d'usure.

Si la Flandre n'autorise plus ce type d'application pour son problème de risque de gonflement, la Wallonie et Bruxelles l'autorise, moyennant le respect de critères bien spécifiques.

a.2 Revêtement en béton

Bien que non autorisées légalement dans ce type d'application, des études sont en cours à ce sujet.

a.3 Pavé

Si cette application n'est pas autorisée en Belgique, l'Allemagne a réalisé des pavés à partir de LD-Grind.

a.4 Chemin non revêtu

La teneur en chaux libre dans la scorie fraîche favorise un durcissement naturel de la couche de surface apprécié pour un chemin secondaire (*remembrement, forestier, halage, ...*), parking ou sentier pédestre (*réduction de l'érosion et de la poussière*). En Allemagne, certaines routes agricoles non revêtues sont composées d'un mélange scorie EAF - scorie classique. La couleur brun foncé s'intègre parfaitement au paysage. L'impact environnemental est nul à très limité.

a.5 Ballast de chemin de fer

La Wallonie et Bruxelles autorisent l'application comme ballast au contraire de la Flandre (*risque de modification de la structure suite au gonflement*).

En Allemagne, elles sont utilisées sur certaines voies ferrées privées (*notamment à proximité d'aciérie*) car la société allemande des chemins de fer (DB – *Deutsch Bahn*) les interdit suite à la présence de fines particules métalliques qui peuvent interférer avec les dispositifs de signalisation électronique composés de câbles posés sur le ballast. Des problèmes similaires ont également été observés avec les dalles en béton armé soutenant les rails. Les variations sont généralement faibles et inférieures aux prescriptions requises.

Un projet de recherche a étudié la possibilité de les utiliser comme couche portante du ballast.

b. Fondation

Si la Flandre n'autorise aucune application en fondation, la scorie classique peut être utilisée en Wallonie et à Bruxelles, dans différentes fondations.

- La *fondation en grave-bitume* ;
- La *fondation en empierrement lié* : Seule, Bruxelles autorise ce type d'application. Au Pays-Bas, le mélange 25% scorie 0/15 + 60% laitier cristallisé 0/60 + 15% laitier granulé a été utilisé pour réaliser une couche de base stabilisée afin d'éviter tout gonflement ;
- La *fondation en empierrement non traité* est autorisée en Wallonie et à Bruxelles.

c. Sous-fondation

Si la Flandre n'autorise aucune application en sous-fondation, la Wallonie et Bruxelles autorisent l'emploi de scories uniquement pour une application en empierrement non traité de sous-fondation.

En Flandre (*Maldegem*), une couche de 30 cm de scorie 32/90 sous une couche de 20 cm de recyclés de béton a été utilisée comme sous-fondation d'une piste provisoire d'accès à des éoliennes.

d. Remblai

Étant donné que les matériaux de fondation et/ou de sous-fondation peuvent être autorisés en remblai, les scories classiques et EAF sont acceptés en Wallonie et à Bruxelles, moyennant le respect de critères adéquats. Toutefois, cette application est rarement utilisée, vu la faible valeur de ce type d'application.

e. Traitement de sol

La scorie fraîche dispose d'une certaine teneur en chaux libre qui peut être utilisée, soit directement à partir d'élément fin (0/3 ou 0/10), soit après broyage comme composé d'un liant hydraulique routier.

e.1 Traitement du sol par les fines de scorie

La *fine de scorie* se définit comme la *fraction fine (0/3 à 0/10) de scories classique ou EAF extraites lors du traitement pour en obtenir la fraction riche en chaux libre*. Ses propriétés dépendent des procédés de production et de refroidissement.

En raison de sa teneur relativement élevée en chaux, une étude du CRR a montré que les fractions fines de scorie fraîche peuvent être utilisées comme liant pour l'amélioration de sols humides en remblai (*Janssens : 2010*). Le dosage est généralement compris entre 10 et 20 % et permet d'obtenir un résultat similaire à celui obtenu avec quelques pourcents de chaux vive. Ceci est rendu possible grâce à une triple action : 1) La correction granulométrique du mélange, 2) La réduction de la teneur en eau du mélange et 3) La floculation des particules argileuses augmentant la perméabilité et réduisant la cohésion.

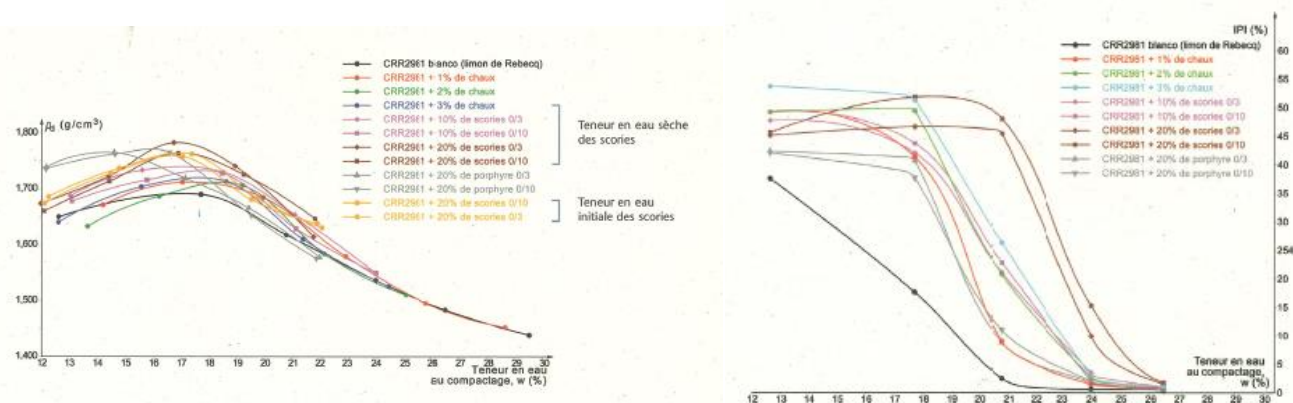


Figure 3.6 : Ensemble des courbes Proctor (à gauche) et IPI (à droite) pour différents mélanges obtenus sur le limon de Rebecq (source : Janssens (2010)).

Sur base de cette étude, les fines de scories ont été inscrites en 2012 au CCT QUALIROUTES (chapitre C.10.2), moyennant certaines spécifications. Cependant, vu l'arrêt des aciéries belge par la suite, l'application n'est plus utilisée de nos jours.

REMARQUE : La société TERRAnova (Liège) qui était l'unique société à commercialiser ce produit sous le nom de TERRAX, a arrêté sa production, suite à l'arrêt de l'aciérie de Chertal. Les tas restants ne sont plus exploités en raison de leur diminution de chaux vive avec le temps.

e.2 Composant d'un Liant Hydraulique Routier (LHR)

La société SGA (filiale d'Eiffage et de Phoenix service) a développé le LHR Sidmix® comprenant 40 à 44 % de scorie classique finement broyée, 50% de laitier moulu et 5 % de gypse. Il convient pour sol (notamment crayeux) et empierrement en application remblai (3-4%), couche de forme (5-7%), assise, voire béton sec compacté (9-12%). Il présente un délai de maniabilité très long (entre 5 et 9 h) et un faible bilan carbone. Ses propriétés sont relativement variables selon la qualité des scories fournies et la difficulté de broyer finement les scories.

3.3.1.3 Autres domaines du génie civil

La scorie classique peut être utilisée dans les applications suivantes :

- Un **béton** à base de scorie LD et de ciment ECOCEM (laitier vitrifié) a été testé sur le site de Fos-sur-Mer ;
- Des **briques et blocs de construction** à partir de la même composition que le béton précédent ;
- Un **béton auto-compactant** : Tomasiello et al. (2010) ont tenté de remplacer un granulats classiques par une scorie EAF ;
- Le **support de dallage industriel** testé expérimentalement, n'a pas montré de problème majeur ;
- Le **renforcement d'ouvrages hydrauliques** (protection de digues, rives, ...) est une bonne filière de valorisation en Hollande, dans les ports belges (Anvers, Gand, Zeebrugge) et à Londres car la densité élevée du matériau et sa résistance à l'usure permet de bien résister à l'action du courant et des vagues ainsi qu'au phénomène d'affouillement. De plus, comme il s'agit d'éléments grossiers, des opérations de concassage souvent onéreuses ne sont pas nécessaires. Dans certains cas, elle constitue une bonne protection vis-à-vis d'une réserve d'eau potable. Le risque de gonflement a une faible importance, vu la quantité importante d'interstices. Le pH de l'eau de mer ($pH = 8$) est peu influencée par l'introduction de scorie basique ;
- Les **blocs de protection des digues de type "Masterblock"** : La scorie LD-Grind offre une densité plus importante que le béton classique et un risque plus faible de gonflement au contact de l'eau ;
- Les **colonnes ballastées** ;
- Le **masque-drainant de remblai** : La société française Eurogranulats a mis en œuvre une scorie LD 0/150 sur la ligne LGV Est (2009 – 2011), vu sa faible teneur en fines, ses bonnes résistances de durabilité climatiques et sa densité élevée ;
- Les **massifs-poids ou remblai de préchargement** en raison de la densité plus importante de la scorie tout en permettant une bonne drainabilité ;

- Le *merlon de protection* ;
- Le *remblai paysager* : La société française VGA a réalisé un remblai paysager recouvert d'argile pour le bassin nautique du parc de l'AA (59 Gravelines : 2012) ;
- Une *zone de drainage sous un terrain de sport ou piste d'équitation* (Moorsele - championnat du monde de saut).

3.3.1.4 Environnement et agriculture

Les scories classiques et électriques peuvent être également utilisées dans les applications suivantes :

- La *décontamination d'un sol, boue et eau pollués acides* : A Zwijnaarde, une scorie 0/7 a permis de décontaminer un bassin de boues de cellulose (2006). A Rieme, une scorie 0/7 a permis de décontaminer un bassin de "tar acide" (*mélange toxique de phénols*) ;
- Le *traitement du phosphore des eaux usées* : La chaux libre des scories classiques et électrique réagit avec le phosphore dissous pour former une hydroxyapatite qui se fixe sur le fer et l'aluminium de la scorie (*projet européen Slasorb : 2009 - 2012*), réduisant ainsi la prolifération de cyanobactéries en zone marécageuse (*source d'eutrophisation*). La société française Jean Voisin développe de mini-stations de traitement sur ce principe, tout comme fonctionne la station d'épuration des eaux usées municipales de Waiuku (*Nouvelle-Zélande*) qui dispose de lits de scorie comme traitement tertiaire (*fin de cycle*). Le traitement dure 3 jours et permet une rétention de 75 à 90% du phosphore durant 5 ans, soit une rétention de 1,25 kg/tonne de scorie. Cette technique nécessite d'importantes superficies de traitement et ne doit pas faire l'objet d'une flore ajoutée afin de ne pas attirer les oiseaux et leurs excréments ;
- La *purification du biogaz* par captage du CO₂ et élimination de l'H₂S ;
- La *construction de digues autour de décharges* et de routes internes ;
- La *transplantation de massifs coralliens menacés ou endommagés* : Des blocs de 25 à 35 cm de scorie EAF riche en CaO fournissent un substrat idéal pour permettre à ces colonies de se régénérer et de profiler (*Institut National égyptien d'Océanographie et de Pêche -HABIB N.- 2011*) ;
- Une *protection contre la vermine et les rongeurs* qui n'apprécient pas les scories LD ;
- Le *chaulage de champ agricole* permet également de réguler le pH. De plus, les quelques métaux lourds présents sont absorbés par les plantes pour leur développement ;
- Un *fertilisant mixte* ou *engrais* : Les scories LD et EAF sont utilisées depuis de nombreuses années comme fertilisant mixte : amendement – engrais sur culture comme sur herbage, soit directement, soit en mélange avec des engrais phosphatés et des engrais potassiques compatibles. Certaines scories riches en phosphore (*Lorraine*) constituent un excellent engrais. Cette filière est devenue moins attractive avec l'abandon des mines européennes et l'importation d'un minerai plus riche en fer. Il faut toutefois vérifier le risque de lixiviation de certaines substances.

3.3.2 Scories inox

La société belge **Orbix** (*ex Recoval*) commercialise une gamme de granulats de différents calibres (0/4, 4/6, 6/10, 10/14 ou 4/14) à base de scories inox "démétallisées" (**STINOX**). Elle commercialise également un fillier très fin, le **FILLINOX**. Ces produits présentent des caractéristiques conformes aux techniques routières (*fillers pour hydrocarbonés et béton de revêtement*).

Plusieurs projets de recherche entre Orbix et des centres de recherche ont permis de trouver des voies d'application à ces produits :

- Le *projet CRAFT* ("*Valorisation and Recycling of Stainless Steel slags*" : CRR : 1999 – 2001) a montré la possibilité de les valoriser dans du béton maigre pour autant que le risque de gonflement soit maîtrisé (*valeur de critère légèrement plus faible*) ;
- Le *projet CARMAT* (CRR, CSTC, CTP, Duferco, UCL : 2010 – 2015) a étudié la possibilité de valoriser certaines fractions peu utilisées de scories inox dans des matériaux de construction (*blocs, briques, pavés et sable-ciment*) en se basant sur la carbonatation accélérée de la chaux à partir de CO₂ industriel, via une autoclave et garantir ainsi la mobilisation durable des contaminants éventuels au sein des matériaux néoformés. Le processus consiste à produire la pièce souhaitée avant son passage dans l'autoclave où elle subit une carbonatation accélérée. Une unité-pilote construite sur le site d'Orbix (*Farciennes*) a permis de vérifier les performances des matériaux et la constance lors de la production.

3.3.2.1 Avantages et inconvénients principaux

Tableau 3.VIII : Avantages et inconvénients des scories inox.

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> ● <i>Forme cubique et arêtes anguleuses des grains</i> permettant d'obtenir une bonne compacité et une bonne résistance à la compression (<i>application liée</i>), moyennant une énergie élevée de compactage. ● <i>Excellente résistances à l'attrition (MDE), à la fragmentation (LA) et au polissage (CPA).</i> ● <i>Excellente compatibilité et adhérence avec tout type de liant (chaux, ciment, LHR, bitume)</i> du fait de sa nature basique et sa structure micro poreuse. ● <i>Excellente résistance au dérapage et désenrobage ainsi qu'un bon comportement Marshall pour la scorie classique</i> ⇒ Revêtement bitumineux. 	<ul style="list-style-type: none"> ● <i>Difficulté de compactage</i> due à l'angularité des grains. La difficulté est proportionnelle au diamètre des grains ● <i>Densité plus élevée</i> que les granulats naturels ⇒ Coût plus élevé de transport et béton plus dense. ● <i>Risque de contamination par lixiviation du chrome</i> ⇒ Applications liées. ● <i>Faible risque de gonflement</i> ⇒ Interdiction de l'utiliser en revêtement en béton ● <i>Absence de propriétés hydrauliques et pouzzolaniques.</i>

a. Risque de lixiviation du chrome

Le chrome intervient dans le processus de production de la couche inox située autour de l'acier. Il se présente, soit sous forme stable, soit sous forme instable qui a tendance à se libérer durant l'essai de lixiviation. Il s'agit principalement des formes trivalente (Cr III) ou hexavalente (Cr VI). Ainsi, un test de lixiviation est nécessaire pour valoriser la scorie.

Toutefois, des études ont montré que la basicité, l'abondance des impuretés (Ca et Si) dans la scorie et les conditions de refroidissement exercent une certaine influence sur la valeur de lixiviation. En effet, celle-ci augmente avec la basicité pour une scorie grossière. De même, à haute basicité, le chrome s'associe plus facilement avec le Ca et Si pour former des formes instables et ainsi faciliter la mobilité du Cr. Il est donc important de contrôler les conditions de refroidissement de la scorie.

D'autre part, des études ont montré qu'en situation réelle, la scorie inox compactée (et non broyée) présente en surface, une couche cimentée qui limite l'entrée d'eau et réduit fortement les quantités réellement lixiviées (d'un rapport pouvant atteindre 100).

3.3.2.2 Routes et voies ferrées

a. Applications en Wallonie

La scorie inox ne peut être utilisée en Wallonie que sous forme de sable, gravillon ou grave lié au ciment ou au bitume et moyennant le respect des critères généraux du C.4.3.15 du CCT QUALIROUTES.

Tableau 3.IX : Critères généraux d'application des scories inox en Wallonie (CCT QUALIROUTES 2020).

Caractéristique	Prescription	Commentaires
Teneur en chaux libre (%)	≤ 5	Au moment de la production, après concassage et déferrisation
Gonflement (%)	Variable selon application	Si D ≤ 31,5 mm
Délitement (%)	≤ 1,5	Si D > 31,5 mm

De plus, la région Wallonne demande la mise à jour d'une comptabilité et d'un certificat d'utilisation pour cette scorie selon l'AGW du 14 juin 2001 (modifié en 2004) favorisant la valorisation de certains déchets.

REMARQUE : La Flandre autorise uniquement la scorie inox pour autant qu'elle respecte les critères de l'OVAM et qu'elle soit en application liée au ciment.

Elle peut être utilisée dans les applications suivantes, moyennant le respect de critères spécifiques à ces applications.

Tableau 3.X : Domaines d'applications d'une scorie inox en Wallonie (CCT QUALIROUTES 2020), moyennant le respect des critères spécifiques à ces applications.

	Revêtement		Fondation	Sous-fondation	Drainage	Remblai
--	------------	--	-----------	----------------	----------	---------

	Hydro-carboné	Béton	Grave-bitume	Béton maigre + BSC	Sable-ciment	Empierrement lié	Empierrement non lié	Empierrement non lié		
Sable	Oui	Non	Oui	Oui	Oui	Non	Non	Non	Non	Non
Gravillon	Oui	Non	Oui (≤ 3,5 %)	Oui (≤ 3 %)	---	Oui (≤ 3 %)	Non	Non	Non	Non
Grave										

b. Revêtement

b.1 Revêtement bitumineux

En raison de ses arêtes anguleuses, son excellente résistance au polissage et ses bonnes propriétés vis-à-vis du liant bitumineux, la scorie inox est particulièrement valorisée en revêtement bitumineux et notamment pour des applications particulières comme des zones de trafic intense, des zones de virage ou de décélération. Elle est également appréciée pour sa propriété à réduire le bruit suite à la présence d'une microporosité.

b.2 Revêtement en béton

Bien que ce type d'application ne soit pas autorisée dans les trois régions belges, le CRR a réalisé une planche d'essais sur l'aire d'autoroute de Tournai (2016 – 2017). Une scorie inox a été utilisée dans un béton de revêtement (*béton routier 0/14*). Le béton composé de 400 kg/m³ de ciment CEM III/A 42,5 a un rapport E/C maximal de 0,45 avec air entraîné. Les premiers résultats montrent de bons résultats en termes de durabilité et de résistance au polissage malgré un aspect rendu lisse.

Tableau 3.XI : Principaux paramètres mesurés par le CRR sur un béton routier avec scorie inox (CRR : 2019).

Paramètres	Valeurs mesurées	Critères cahier des charges QUALIROUTES
Résistance à la compression	63 – 79 MPa	≥ 50 MPa
Absorption d'eau par immersion	Valeur moyenne : 6,2%	< 6,9 %
Résistance au gel avec sels de déverglaçage	0,45 – 4,85 g/dm ²	< 5 g/dm ²
pH	12,5	---

Des pistes cyclables ont été réalisées avec un revêtement en béton contenant avec des scories inox.

b.3 Pavés

Le projet européen CARMAT (*Orbix, CRR, CTP, CSTC et ISSeP*) a développé un processus de carbonatation par autoclave qui permet d'obtenir des pavés autobloquants, à partir de CO₂ émis par les entreprises. Le problème majeur est le poids supérieur aux éléments classiques.

c. Fondation

Si la Flandre n'autorise aucune application en fondation, la scorie inox peut être utilisée en Wallonie et à Bruxelles, dans différentes fondations liées.

- La *fondation en grave-bitume* ;
- La *fondation en sable-ciment* ;
- La *fondation en empierrement lié*.

Des planches d'essais ont été réalisés avec les fractions moins valorisables sur le site Orbix de Farciennes (2017 – 2018) pour des applications en sable-ciment et empierrement lié. Les valeurs de résistance à la compression pour les mélanges à 6 et 8 % de ciment sont conformes mais pas les valeurs de portance déterminées à la plaque statique belge.

REMARQUE : Il y a lieu d'utiliser un bitume adéquat dans la fondation en grave-bitume ou dans la couche d'émulsion de protection contre la dessiccation pour les mélanges liés au liant hydraulique. Dans le cas des planches d'essais CRR, un bitume de type COLACID R 65 a été utilisé comme émulsion de protection.

d. Sous-fondation

Elle n'est pas autorisée pour ce type d'application (*non liée*), vu le risque de contamination du sol par lixiviation du chrome.

e. Remblai

Elle n'est pas autorisée pour ce type d'application (*souvent non liée*), vu le risque de contamination du sol par lixiviation du chrome.

3.3.2.3 Autres domaines du génie civil

La scorie classique peut être utilisée dans les applications suivantes :

- Un *élément linéaire coulé en place* (*garde-corps*) : Le crash-test n'a pas montré de différence malgré une densité plus importante du massif. De plus, le pH élevé ne dégrade pas les torons en acier galvanisé ;
- Des *dalles de terrasse, blocs de construction pleins ou creux, tuiles* ont été produites lors du projet CARMAT (*Orbix, CRR, CTP, CSTC et ISSeP*), via un processus de carbonatation par autoclave. Le problème majeur est le poids supérieur aux éléments classique ;
- Les *blocs en béton de type Masterblock*. La scorie inox présente une faible teneur en oxydes de fer (*pas de risque de coloration*) ;
- Le *liant hydraulique de brique* ;
- Le *remplissage des zones souterraines*.

3.3.2.4 Environnement et agriculture

La scorie inox peut être également utilisée dans l'application suivante :

- L'*amendement agricole* : La scorie inox permet de corriger le pH, d'apporter les éléments nutritifs, la silice soluble tout en réduisant les insectes nocifs et les maladies. Ce produit est commercialisé aux USA sous le nom de RECLIME (® *recmix*). Elle peut également servir dans des gazons techniques (*Excell Materials*).

3.3.3 Autres types de scories et déchets d'aciérie

D'autres sous-produits sont également générés par les aciéries mais apparaissent généralement en moindre quantité.

Ces produits ne sont pas reconnus dans les cahiers des charges routiers.

3.3.3.1 Scorie non ferreuse d'aluminium (Al)

a. Généralités

La *scorie saline d'aluminium* est un *sous-produit généré lors de la formation d'alliage d'aluminium secondaire*.

La technique consiste à introduire dans le four, des sels pour empêcher l'oxydation de l'aluminium fondu à l'air. Ces sels retiennent à la fois l'oxyde d'aluminium mais aussi un peu d'acier et de résidus d'aluminium. Ce sel est ensuite récupéré à part dans une lingotière pour y former une scorie saline.

Une tonne d'alliage d'aluminium secondaire génère 300 à 800 kg de scories salines.

La production dans le monde est estimée à 4,4 MT dont 0,9 MT en Europe.

Cette scorie est considérée comme un déchet dangereux par la législation européenne et doit subir un traitement qui permet de récupérer les sels régénérés (*NaCl, KCl*). Le traitement consiste à concasser la scorie avant de la cribler et de la faire passer au séparateur magnétique (*séparation des métaux non ferreux*). Cela permet de récupérer les nodules d'aluminium. Reste alors la gangue saline qui est mise en solution (*traitement humide*) avant d'être placée dans un réacteur pour inertage. Après filtration de la solution et lavage de la gangue, il subsiste une "pâte à modeler" qui, une fois débarrassée de son eau (30%), forme un produit riche en oxydes d'aluminium ($\pm 70\%$). Le reste est constitué de sels divers qui doit être lié par un liant hydraulique. L'alumine est présente sous plusieurs formes minéralogiques (*spinelles, boémite, corindon, etc.*).

b. Valorisation

La société française RAV commercialise ce produit sous le nom de Valoxy® (60 000 t/an) comme alternative à la bauxite (*principale source d'aluminium*) puisque contenant jusqu'à 70 % d'oxydes d'alumine.



Figure 3.7 : Vue de la Valoxy®.

Chaque lot de scorie est traité à part car il se caractérise par un niveau de réactivité et de forme distinct. Les lots sont par la suite mélangés en fonction notamment de leurs teneurs en sels et en alliages afin d'obtenir un produit homogène, constant et stable.

Le Valoxy® n'est pas utilisé comme granulats mais sert à d'autres applications comme :

- Un *additif du ciment clinker* : La haute teneur en alumine favorise la formation de CAH dans le ciment à prise rapide ;
- La *fabrication de produits réfractaires et de céramique* : Un matériau riche en aluminium est résistant aux fortes températures ;
- La *laine minérale* : L'aluminium réduit la solubilité des particules fines dans l'air, réduisant ainsi le risque de maladies pulmonaires ;
- Le *traitement des aciers inox* : Le Valoxy® peut se substituer au bore plus cher et offre de meilleures caractéristiques aux scories inox ;
- Le *géopolymère* servant notamment comme protection contre les incendies dans les tunnels.

3.3.3.2 Scories non ferreuses de cuivre (Cu) et de nickel (Ni)

a. Généralités

Les scories de cuivre et nickel sont générées à partir d'un procédé pyrométallurgique sur le minerai de soufre. Ce dernier se retrouve dans la scorie sous forme de dioxyde de soufre (SO_2) ainsi que la chaux qui sert de purifiant. Le fer présent dans le minerai se retrouve également dans la scorie.

b. Traitement

Un traitement lié à la valorisation de la scorie de nickel consiste à la carbonater au moyen du CO_2 gazeux également produit lors du traitement pyrométallurgique. Le principe consiste à réaliser le mélange dans un broyeur à billes agité, soit un milieu abrasif qui nettoie continuellement les surfaces réactives passivées qui sont récupérées par lixiviation. Toutefois, plus le taux de carbonatation désiré est important, plus l'énergie spécifique est élevée. Il faut donc trouver un bon compromis. Cette carbonatation permet alors d'utiliser les scories comme sable, pouzzolanes, voire ciment selon son taux de carbonatation. C'est notamment l'objectif du projet de recherche français Carboval (2018 – 2022).

c. Caractérisation

REMARQUE : Les propriétés peuvent varier d'un producteur à l'autre selon le processus utilisé (*vitriifié ou granulé*) et la nature du minerai de départ.

Les principales caractéristiques sont reprises dans le tableau ci-dessous.

Tableau 3.XII : Principales caractéristiques des scories de cuivre et de nickel.

Caractéristiques	Scorie de cuivre		Scorie de nickel	
	Cristallisée	Granulée	Cristallisée	Granulée
Couleur visuelle	Noire		Brun noir	Brun rouge
Texture	Granulat grossier Lisse et vitreuse Grains angulaires	Sable Vitrée et poreuse Grains angulaires	Granulat grossier Lisse et vitreuse Grains angulaires	Sable Vitrée et plus poreuse
Composition chimique				
<i>SiO₂</i>	36,6		29,0	
<i>Al₂O₃</i>	8,1		Trace	
<i>Fe₂O₃</i>	---		53,1	
<i>FeO</i>	35,3		---	
<i>CaO</i>	2,0		3,96	
<i>Chaux libre</i>	---		---	
<i>MgO</i>	---		1,56	
<i>SO₃</i>	---		0,36	
<i>P₂O₅</i>	---		---	
<i>BaO</i>	---		---	
Caractéristiques environnementales	Risque de lixiviation de soufre (<i>odeur de soufre et décoloration de l'eau</i>)			
Densité	2,8 – 3,8 (<i>selon teneur en Fe</i>)		3,5	3,3 – 3,4
Coefficient d'absorption (%)	0,13	0,17	0,37	0,4 – 0,45
Durabilité mécanique <i>Los Angeles (LA)</i>	24		22	
Durabilité climatique <i>Essai au sulfate de sodium</i>	0,9		0,4	
Autres				
<i>Angle de friction interne</i>	40 – 53		40	
<i>Dureté Mohs</i>	6 – 7		6 – 7	

d. Valorisation matière

Les principales applications des scories de cuivre et nickel sont :

- Des **applications granulaires en domaines routier et ferroviaire** (USA et Canada). Leur compactage est généralement plus difficile qu'avec un granulat classique.

REMARQUE : Dans le passé, ces scories étaient envoyées en décharge ou mises en stock car ces solutions coûtaient moins chers que de les transporter sur de grandes distances vers les filières de valorisation.

- *Enrobé bitumineux à chaud (substitution partielle) ;*
- *Ballast ;*
- *Couche de base pour voirie rurale ou minière (passage d'engins lourds), soit des conditions extrêmes. Les scories ont montré une excellente stabilité, un bon drainage et de bonnes résistances de durabilité (mécanique et climatique). Il faut être prudent en ce qui concerne le risque de relargage de soufre par lixiviation ;*
- *Remblai.*

REMARQUE : Malgré sa teneur élevée en Fe₂O₃, la scorie de nickel peut corroder les éléments en fer (*tuyaux et armatures*). Le Canada préconise une couche de granulat inerte entre le matériau ferreux et la scorie.

- La **composition de ciment spécifique** à partir de scorie granulée (USA) ou d'un **ciment silico-magnésien** (France) ;
- L'**addition minérale** est une des pistes étudiées en France dans le cadre du projet de recherche Carboval ;
- Un **composant de produits abrasifs et de toiture** (USA) ;
- Le **comblement de cavités souterraines** (USA).

3.3.3.3 Scorie de manganèse et de molybdène

Le groupe minier Rio Tinto a étudié avec le BRGM, la possibilité de valoriser les scories de manganèse et de molybdène issus du traitement de la smaltine stockés sur certains sites. Celles-ci peuvent se présenter sous différents faciès et couleurs. Après une étude minéralogique, il a été mis en évidence la possibilité de récupérer le titane, le manganèse résiduel, voire le chrome, ainsi que certains métaux d'intérêt après concassage fin des scories prélevés.



Figure 3.8 : Différents faciès et couleurs des scories de manganèse et de molybdène (source : BRGM).

3.3.3.4 Scorie non ferreuse de phosphore (P)

a. Généralités

La scorie de phosphore provient du processus de raffinage du phosphore dans un four électrique en présence de silice, de carbone et du fer. Ce dernier réagit avec le phosphore pour former du ferrophosphore qui peut être exploité. Lors du refroidissement à l'air, certaines scories peuvent être gonflées.

b. Caractérisation

REMARQUE : Les propriétés peuvent varier d'un producteur à l'autre selon le processus utilisé (*vitrifié ou granulé*) et la nature du minerai de départ.

Les principales caractéristiques sont reprises dans le tableau ci-dessous.

Tableau 3.XIII : Principales caractéristiques des scories de phosphore.

Caractéristiques	Scorie de phosphore	
	Cristallisée	Granulée
Couleur visuelle	Noire à gris foncé	
Texture	Granulat Grains plats et allongés aux formes irrégulières	Sable Grains angulaires aux formes régulières
Composition chimique		
<i>SiO₂</i>	41,3	
<i>Al₂O₃</i>	8,8	
<i>Fe₂O₃</i>	---	
<i>FeO</i>	---	
<i>CaO</i>	44,1	
<i>Chaux libre</i>	---	
<i>MgO</i>	---	
<i>SO₃</i>	---	
<i>P₂O₅</i>	---	

	1,3	
Caractéristiques environnementales	Risque de lixiviation de soufre (<i>odeur de soufre et décoloration de l'eau</i>) Risque d'avoir de l'uranium en faible concentration (30 – 200 ppm)	
Propriétés physiques		
<i>Densité</i>	1,36 – 1,44	1,20 – 1,35
<i>Coefficient d'absorption (%)</i>	0,88 – 1 000 (<i>scorie gonflée</i>) 1,0 – 1,5 > 2 (<i>scorie gonflée</i>)	1,5 – 2,0
Durabilité mécanique <i>Los Angeles (L_A)</i>	< 30	
Durabilité climatique <i>Essai au sulfate de sodium</i>	< 1	

c. Valorisation matière

REMARQUE : La scorie de phosphore est plus légère qu'un granulats classique. Cela permet de faire notamment des économies sur les coûts de transport.

Les principales applications des scories de phosphore sont :

- Des *applications granulaires en domaine routier (USA)*. Leur compactage est généralement plus difficile qu'avec un granulats classique.

REMARQUE : Dans le passé, ces scories étaient envoyées en décharge ou mises en stock car ces solutions coûtaient moins chers que de les transporter sur de grandes distances vers les filières de valorisation.

- *Enrobé bitumineux à chaud (substitution partielle) ;*
- *Couche de base pour voirie rurale.* La scorie a montré une excellente stabilité, un bon drainage et de bonnes résistances de durabilité (*mécanique et climatique*). Il faut être prudent en ce qui concerne le risque de relargage de soufre par lixiviation ;
- *Remblai.*
- Un *composé pour maçonnerie léger et ciment (USA)* concerne la scorie granulée ;
- Un *composé de four à ciment (USA) ;*
- Le *comblement de cavités souterraines (USA)*.

3.3.3.5 Scorie de plomb (Pb) et zinc (Zn)

a. Généralités

Les scories de plomb et de zinc (*souvent associés dans la nature*) résultent du processus de formation de plomb et de zinc à partir de minerais riches en sulfures, sulfates et oxydes.

b. Caractérisation

REMARQUE : Les propriétés peuvent varier d'un producteur à l'autre selon le processus utilisé (*vitriifié ou granulé*) et la nature du minerai de départ.

Les principales caractéristiques sont reprises dans le tableau ci-dessous.

Tableau 3.XIV : Principales caractéristiques des scories de plomb et de zinc (et plomb-zinc).

Caractéristiques	Scorie de plomb et zinc	
	<i>Cristallisée</i>	<i>Granulée</i>
Couleur visuelle	Noire à rouge	
Texture	Granulats Grains angulaires cubiques	
Composition chimique	Plomb	Plomb – zinc
<i>SiO₂</i>	35,0	17,6
<i>Al₂O₃</i>	---	6,1
<i>Fe₂O₃</i>	---	---
<i>FeO</i>	28,7	---
<i>CaO</i>	22,2	19,5

<i>Chaux libre</i>	---	---
<i>MgO</i>	---	1,3
<i>SO₃</i>	---	---
<i>P₂O₅</i>	---	---
<i>BaO</i>	---	2,0
Caractéristiques environnementales	Risque de lixiviation de soufre (<i>odeur de soufre et décoloration de l'eau</i>)	
Densité	> 3	2,5 – 3,6
Coefficient d'absorption (%)	---	2 – 5 %

c. Valorisation matière

Les principales applications des scories de plomb et zinc sont :

- Une **application granulaire en domaine routier (USA)** :

REMARQUE : Dans le passé, ces scories étaient envoyées en décharge ou mises en stock car ces solutions coûtaient moins chers que de les transporter sur de grandes distances vers les filières de valorisation.

- **Enrobés bitumineux à chaud (pour uniquement scorie à zinc).**

REMARQUE : Leur valorisation en couche granulaire ou remblai n'est généralement pas acceptée, vu leur risque de lixiviation du plomb et/ou du zinc. Le Japon a accepté certains cas particuliers de remblai et le Royaume-Uni a utilisé ce type de scorie pour des dalles de plancher de bâtiments.

- Un **composé pour carreaux de céramique (USA)**.

3.3.3.6 Laitier de poche ou laitier blanc

Le laitier de poche est issu de l'aciérie secondaire qui consiste à affiner l'acier dans sa dernière nuance. La composition de ce laitier est donc très variable.

Un exemple d'application est la mise en œuvre d'un remblai technique sous une couche étanche pour un bassin de rétention d'eau à l'aciérie LME de Valenciennes (*Martin G. : 2019*).

3.3.3.7 Poussières de four électrique

La **poussière de four électrique** se définit comme *l'ensemble des fines particules qui s'échappent dans l'air lors de la transformation de la ferraille en fonte dans un four électrique et qui sont récupérées dans des filtres*. Un four électrique produit 15 à 20 kg de poussières/T de métal, soit plus de 6 millions T/an dans le monde.

Cette poussière est considérée comme un déchet dangereux car elle contient de nombreux métaux (*Zn, Fe, Pb, etc.*).

REMARQUE : La teneur en zinc ne fait qu'augmenter avec le temps, étant donné la présence de plus en plus abondante de ferrailles zinguées.

Il est donc nécessaire de réaliser un traitement en vue de récupérer ces matériaux. Plusieurs processus pyrométallurgiques existent :

- Le **procédé Waelz** ou **technique du four tournant** élimine le résidu contenant le fer difficilement valorisable ;
- La **technique Zincox** (CTP - Belgique) permet de récupérer 97% du zinc, du plomb et du fer, via un four à sole tournante et un four à arc électrique. Un mélange poussières + charbon (150-250 kg/tonne de poussières) + eau + liant organique (*amidon de blé*) est aggloméré en briquettes. La briquette préalablement séchée est introduite dans un four à sole à 1 350°C (*temps de séjour : 10 à 20 min*) où elle perd plus de 40% de son poids par volatilisation des métaux et des sels zinc, plomb, chlore, fluor, potassium et sodium et réduction des oxydes de fer en fer métallique (*plus de 85 %*). La briquette réduite est déchargée du four et envoyée dans un four électrique de type BAF (*Brushing Arc Furnace*) qui génère, par fusion, une fonte riche en fer (*fer résiduel contenu dans les briquettes*) et une scorie valorisée après refroidissement en granulats. Un traitement de réduction du soufre (<0,5 %) est réalisé par ajout de chaux ou de carbure de calcium sur la fonte. D'autre part, la fumée issue du four à sole fournit après plusieurs paliers de température, des oxydes de zinc sous forme solide qui font l'objet d'opérations de lavage (*réduction du chlore et du fluor*). La fumée du four BAF riche en CO et en éléments non réduits dans le premier four, est également traitée dans une chambre

de postcombustion où les oxydes de zinc sont également récupérés. Ce dispositif offre une réduction de 30 % d'émission des gaz à effet de serre par rapport au procédé Waelz.

4. **BIBLIOGRAPHIE**

- ALEXANDRE J. (1993) - "*Les graves-laitier : Un matériau nouveau pour les techniques des bétons compactés au rouleau.*"
Revue Laitiers de Hauts-Fourneaux, N° 75, 1993
- BAILLY C. (2013) - "*Une alumine alternative*" - Revue CBCP n° 910-911/Mars 2013, pp 58-60
- BIALUCHA R., NICOLL R. et WETZEL T. (2008) - "*Du laitier sur les routes de campagne – Rien d'étonnant et pourtant !*" - Revue Laitiers sidérurgiques n°93 (Novembre 2008), pp 16-23.
- BRU K. (2019) - "*CHROMIC : Récupération des métaux à partir des laitiers sidérurgiques*" - Journée technique AFOCO - Lille (2019).
- CHOQUET F. (1984) - "*Etude en laboratoire des possibilités de valorisation des scories d'aciéries et de laitiers de haut-fourneau en construction routière.*" - C.R.R, CR 22/84.
- CLIMATMUNDI (2019) - "*Empreinte carbone des granulats issus de laitiers sidérurgiques*" - Journée technique AFOCO - Lille 2019.
- COST 337 (2000) - "*Unbound Granular Materials for Road Pavements – Final Report of the Action*" - Transport Research - European Commission.
- CRM (1997) - "*Valorisation de la scorie LD avec les résidus urbains traités. Partim : Etude d'un matériau de qualité destiné à la construction de fondations de routes*" - CRM (Centre de Recherches Métallurgiques).
- CTPL (Centre Technique et de Promotion des Laitiers sidérurgiques) : Fiches techniques et sites internet.
- DRON R. (1984) - "*Les nouveaux activants du laitier*" - Revue Laitiers de Hauts-Fourneaux, N° 57, 3/1984
- EUROGRANULATS (2011) - "*Utilisation des scories LD en masques drainants sur la LGV Est européenne*" - Journée technique AFOCO - Marseille (2011).
- FHWA (1997) : "*User Guidelines for waste and Byproducts Materials in Pavement Construction*" - FHWA-97-148
- HABIB N. (2011) - "*Les laitiers d'aciérie électrique au secours des récifs coralliens*" - Laitiers sidérurgiques - CTPL n°97 (Avril 2011), pp 8-16
- HANAFUSA. M and § (1991) - "*The effectiveness of granulated blast furnace slag*" - Waste Materials in construction. Elsevier, pp 467-474
- HANOTEAU (2019) - "*Valorisation de granulats et de fillers de scories d'acier inoxydables en technique routière*" - Journée technique AFOCO - Lille (2019).
- JANSSENS B. (2010) - "*Infrastructures routières : Ouvrons la voie aux scories LD*" - Laitiers sidérurgiques - CTPL n°95 (Mars 2010)
- LECOMTE P. (1968) - "*Etude du coefficient α des laitiers de haut-fourneau*" - Article du centre National de Recherches métallurgiques.
- LEGRET M. (2011) - "*Les laitiers LD tiennent la route !*" - Laitiers sidérurgiques - CTPL n°98 (Octobre 2012), pp 10-19
- MARTIN G. (2019) - "*Une utilisation innovante des laitiers de poche*" - Journée technique AFOCO - Lille (2019).
- MERKEL Th. (2008) - "*Des laitiers d'aciérie pour les voies ferrées. Ca roule !*" - Revue Laitiers sidérurgiques n°93 (Novembre 2008), pp 8-14.
- MINET Ph. (2009) - "*Poussières d'aciérie électrique – Recyclage efficace et écologique*" - Recyclage et valorisation, n°24/mars 2009, pp 43-46
- MUCKENSTURM Th. et TODARO P. (2011) - "*Techniques routières – Les laitiers de convertisseur font désormais jeu égal avec les granulats naturels.*" - Laitiers sidérurgiques - CTPL n°97 (Avril 2011), pp 18-29
- RAYSSAC E., AURIOL J-C., DENELEE D., de LARRARD Fr., LEDEE V. et PLATRET G. (2009) - "*Valorisation de laitiers d'aciérie LD pour les infrastructures routières*" - Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées, 275 (2009) pp 27-38.
- RONDEUX M., COURARD L. MICHEL F., VANHAMME G, PIERRE C, POLLET V, LECOMTE I et DIERYCK V. (2014) - "*Durabilité des ciments ternaires à base de laitiers vis-à-vis des attaques sulfatiques*" - Exposé de la Quinzième édition des Journées Scientifiques du Regroupement Francophone pour la Recherche et la Formation sur le Béton (Douai – France / 03-04 juillet 2014), pp 1-9.
- SEBILEAU J.L. (1982) - "*Les briques de laitier.*" Revue Laitiers de Hauts-Fourneaux, N° 51, 2/1982

SETRA (2012) – " *Guide d'acceptabilité environnementale de matériaux alternatifs en technique routière : Les laitiers sidérurgiques*" - Sétra (Octobre 2012).

TOMASIELLO S. et FELITTI M. (2010): "EAF Slag in self compacting concretes"- Architecture and Civil Engineering Vol. 8, N°1, pp 13-21.

VERHASSELT A. (1991) - "Sous-produits industriels pour la réalisation de mélanges liés de fondation : Laitiers de haut-fourneau concassés, scories LD et cendres volantes."- C.R.R, CR 33/91

Cahiers des charges

QUALIROUTES (Janvier 2020)

SB 250 versie 4.1

CCT 2015