

Laitiers de haut-fourneau

Mise à jour de la version : 04/04/2013

1	Définition.....	1
2	Lois, normes, guides.....	2
3	Origine, élaboration, stockage	4
4	Caractéristiques physico-chimiques	7
5	Caractéristiques géotechniques	11
6	Caractéristiques environnementales.....	14
7	Aspects sanitaires.....	18
8	Usages (Types d'infrastructures)	19
9	Références bibliographique	21
10	Auteurs et relecteurs.....	24

1 Définition

Le laitier de haut-fourneau est produit par les usines sidérurgiques intégrées, également appelées « en filière fonte ». La fonte sidérurgique est produite au niveau du haut fourneau lors de la réduction des minerais de fer (composés d'oxydes de fer et d'une gangue minérale) par le carbone du coke (figure 1). Les éléments non ferreux du minerai (silice, chaux et alumine) ainsi que les additifs minéraux se retrouvent dans le laitier de haut-fourneau, surnageant sur la fonte par effet de densité. Le laitier est ensuite séparé de la fonte grâce à un siphon. (Figure 1).

Le laitier sort sous forme liquide à 1500°C du haut-fourneau.

Il existe deux procédés majeurs pour le refroidir :

- lentement, à l'air libre, dans des fosses, et l'on obtient alors du laitier de haut-fourneau cristallisé.
- brusquement, à l'eau, dans un granulateur, et l'on obtient alors du laitier de haut-fourneau vitrifié, souvent nommé "granulé".

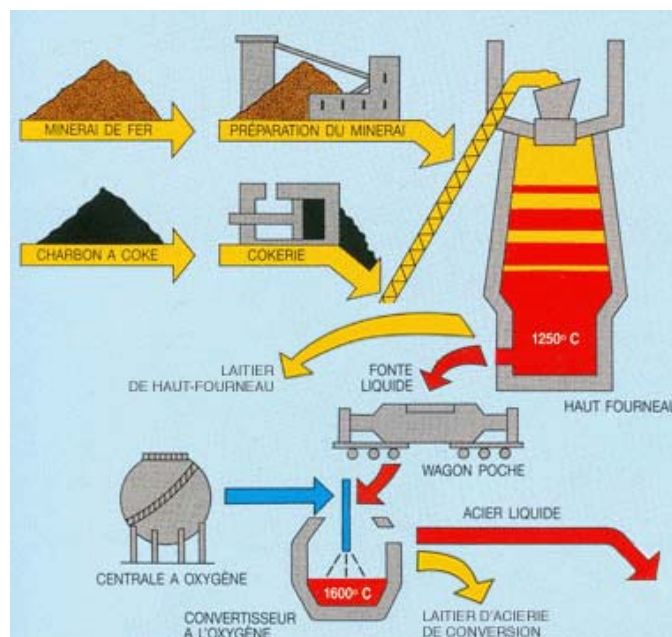


Figure 1 : Filière fonte (Source CTPL)

Selon la nature des minerais, on distingue trois sortes de laitiers :

- les laitiers issus de minerai de fer lorrain, riche en phosphore, (dits « laitiers Thomas T ») ;
- les laitiers issus de minerai de fer importé, pauvre en phosphore, (dits « laitiers hématites H »). Ce sont ces derniers qui sont les plus courants en France ;
- les laitiers issus d'autres minerais de fer (dits laitiers « A »).

2 Lois, normes, guides

2.1 Lois

Une synthèse exhaustive de la législation concernant les laitiers sidérurgiques est accessible dans la revue « Laitiers Sidérurgiques » n° [100 du CTPL](#) (octobre 2012). Ce paragraphe n'en reprend que les éléments principaux.

Sur le territoire français, les laitiers sidérurgiques (et a fortiori ceux de haut-fourneau) sont considérés juridiquement comme des déchets tels que définis par le Titre IV 1-1, [Article L.541-1-1 du Code de l'Environnement](#) (modifié par [l'ordonnance 2010-1579 du 17 décembre 2010](#)).

À ce titre, ils doivent respecter la réglementation en matière de traitement et installations de traitement (dès lors qu'ils ne sont pas mis sur le marché pour un usage ultérieur). Le [décret n°2011-828 du 11 juillet 2011](#) fixe les dispositions en matière de transport et de traçabilité avec l'obligation de tenue d'un registre depuis juillet 2012. Ce registre qui doit être conservé durant trois années recense les informations relatives à la quantité et la nature des matériaux, leur traitement et les modalités d'expédition.

2.2 Normes

Les produits issus des laitiers de haut-fourneau (comme tous les laitiers sidérurgiques) sont normalisés au niveau européen en ce qui concerne leurs utilisations majeures :

- Normes européennes « granulats » pour le laitier HF cristallisé
 - NF EN 12620 "Granulats pour béton",
 - NF EN 13242 "Granulats pour matériaux traités au liant hydraulique et pour matériaux non traités",
 - NF EN 13043 "Granulats pour mélanges hydrocarbonés et pour enduits superficiels",
 - NF EN 13383 "Enrochements",
 - ainsi que par la norme française XP P 18-545 "Granulats".
- Normes européennes pour le laitier HF vitrifié pour les usages matériaux routiers, liants hydrauliques et béton prêt à l'emploi :
 - NF EN 14227-2 « sables laitier et graves laitier »,
 - NF EN 14227-12 « sols traités au laitier »,
 - NF EN 197 « ciments »,
 - NF EN 13282 « liants hydrauliques routiers (LHR) »,
 - NF EN 206 "Béton",
 - NF EN 15167-1 « Laitier de haut-fourneau vitrifié moulu pour addition dans le béton ».

2.3 Codification

Selon [l'annexe 2 de l'article R541-8 du Code de l'Environnement](#), les laitiers d'aciérie sont classés sous les numéros : 10 02 01 « Déchets des laitiers de haut-fourneau et d'aciérie ». Les laitiers sont classés comme déchets provenant de procédés thermiques ; par contre, ils ne sont pas classés comme déchets dangereux.

2.4 Guides

Les guides techniques principaux faisant référence en matière d'utilisation des laitiers de haut-fourneau en techniques routières sont les suivants :

SETRA-LCPC, 1992 « Réalisation des remblais et des couches de forme ».

SETRA-LCPC, 1994 « Remblayage des tranchées et réfections de chaussées»

SETRA-LCPC, 1998. « Réseau routier national. Catalogue des structures types de chaussées neuves.»

SETRA – [Acceptabilité environnementale de matériaux alternatifs en techniques routières – Les laitiers sidérurgiques – Octobre 2012](#) dont les principes sont détaillés au paragraphe 7.2

CETE de l'Est - [Guides d'utilisation des matériaux lorrains en technique routière – Guide laitier de haut fourneau, Février 2010](#)

CETE Nord-Picardie - [Filières de valorisation des déchets du BTP et des Co-produits industriels de la région Nord-Pas de Calais](#) – Guide d'aide à la décision à destination des Maîtres d'Ouvrage, Maîtres d'Œuvre et Bureaux de Contrôles – CRGV – Mars 2011

PREDIS Nord Pas-de-Calais – [Guides Techniques Régionaux relatifs à la valorisation des déchets et co-produits industriels](#) CETE Nord Picardie/École des Mines de Douai, Juillet 2002

3 Origine, élaboration, stockage

3.1 Origine

Le haut-fourneau est un réacteur à lit consommable à contre-courant (SOLLAC, 1975). Les deux réactions principales qui s'y déroulent sont des réactions de réduction des oxydes et d'échange entre le métal et le laitier. On introduit par le gueulard alternativement du coke, du minerai et du fondant, qui sont les matières premières utilisées pour l'élaboration de la fonte.

Le lit de fusion comprend des couches alternées de coke, de minerai aggloméré et d'une faible quantité de fondant. Le coke, après combustion sous l'effet du vent chaud soufflé par les tuyères (1250°C), conduit à la fusion des matières premières introduites (appelées charges) et à la réduction du minerai. Les gaz de gueulard dépoussiérés sont utilisés pour préchauffer le « vent » dans des récupérateurs de chaleur ou cowpers. Les temps de séjour moyens sont d'environ 8 heures pour les solides et de 3 secondes pour les gaz.

Formé à partir des constituants du minerai, du fondant et des cendres du coke, le laitier est un silicate d'aluminium, de calcium et de magnésium. Il contient en outre des oxydes de manganèse et de fer en faible quantité, ainsi que du sulfure de calcium. Le laitier a un rôle double :

- permettre l'élimination de la gangue à l'aide de caractéristiques de fusibilité et de fluidité convenables,
- permettre les réactions d'échange avec le métal liquide agissant sur la composition de celui-ci.

La fonte en fusion contient les éléments suivants : Fe, C, Si, Mn, P, S... et le laitier en fusion en contient les éléments SiO_2 , P_2O_5 , MnO, CaO, Al_2O_3 ...

3.2 Formation

Aux températures atteintes, tous les constituants non métalliques et non gazeux de la charge se liquéfient : la densité du liquide ainsi obtenu (le laitier) est d'environ 3 alors que celle de la fonte est de 7. Il y a donc séparation par gravité du laitier et de la fonte : le laitier surnage à la surface du bain de fonte dans le creuset du haut-fourneau et rassemble les éléments provenant de la gangue, du fondant et des cendres de combustion. La séparation de la fonte et du laitier peut se faire par deux trous de coulée séparés (un trou de coulée haut permet d'assurer l'évacuation du laitier et un trou de coulée bas permet d'évacuer la fonte) ou par le même trou (un dispositif de siphonage permet leur

séparation).

Les températures pratiques de coulée de la fonte, présentées dans le Tableau 1, sont nécessairement élevées pour disposer d'une réserve thermique suffisante et éviter un début de solidification au cours du transport jusqu'à l'aciérie, ainsi, surtout, qu'une précipitation de paillettes de carbone.

Tableau 1 : différentes températures de coulées de la fonte et du laitier en fonction de leur origine
(Michard et Javelle, 1968)

Fer métal référence 1535 °C	% C	% Si	% P	% Mn	Températures liquides de la fonte	Températures de coulées de la fonte	Températures de coulées du laitier
Fonte Thomas	3,8	0,4	1,8	0,3	1200 °C	1350 à 1450 °C	1425 à 1525 °C
Fonte hématite	4,3	0,6	0,2	0,9	1320 °C	1450 à 1500 °C	1525 à 1575 °C

On parle de laitiers de « fraîche production » lorsqu'ils entrent, dès leur élaboration dans la filière de valorisation par opposition aux « laitiers de crassiers » qui sont des stocks de laitiers de fraîche production constitués au fil des décennies.

Le type de refroidissement du laitier peut conduire à deux formes de laitier décrites ci-après.

Le **laitier cristallisé** est produit à partir d'un laitier liquide à 1300°C /1500°C qui est évacué immédiatement en poche à laitier, dès la sortie du haut-fourneau vers des zones spécifiques nommées crassiers, pour y être déversé, coulée après coulée. Il s'y refroidit lentement, se transformant ainsi en roche dure artificielle. Le laitier cristallisé, chimiquement stable, est destiné à être concassé. Ses constituants sont essentiellement des silicates et des silico-aluminates de calcium. Les laitiers de haut-fourneau cristallisés permettent l'élaboration de granulats au sens de la norme française XP P 18-545 et des normes européennes granulats (NF EN 12620, 13242, 13043 et 13383).

Le **laitier vitrifié** est brutalement refroidi à l'eau (trempe), il présente une structure vitreuse désordonnée, susceptible, sous certaines conditions, d'évoluer vers une forme cristalline stable en développant des résistances mécaniques, comme le ferait un ciment. Les laitiers de haut-fourneau vitrifiés possèdent des propriétés hydrauliques mises à profit pour les formulations des ciments ou directement dans le traitement des assises de chaussées. Seul le procédé de granulation est utilisé à ce jour : il aboutit à la production de *laitier granulé*. Le refroidissement se fait en bassin ou par jet d'eau sous pression. Sur certains sites comme à Dunkerque, c'est un autre procédé de refroidissement qui est utilisé, le système INBA (brevet de refroidissement à apports hydriques contrôlés avec tambour de déshydratation et recyclage d'eau).

Le laitier moulu peut être ajouté au béton pour améliorer certaines de ses propriétés ou lui conférer des propriétés particulières comme le comportement aux milieux agressifs et à l'alcali-réaction, l'exothermicité ou la porosité. Il provient du broyage du laitier vitrifié.

Il existait jusqu'en 2009 un autre procédé produisant le *laitier bouleté*. Le laitier de haut fourneau était soumis à deux types d'actions, un jet d'eau et une action mécanique. Le laitier liquide se déversait sur un tambour tournant cannelé qui comportait des trous en périphérie, alimentés en eau sous pression. Les particules de laitiers étaient alors projetées à plusieurs mètres du tambour, ce qui permettait une trempe à l'air pendant la durée du trajet des particules ; cette technique n'était utilisée qu'à Fos-sur-Mer.

3.3 Élaboration

L'élaboration des laitiers de haut-fourneau produit toute une gamme de granulats (laitiers cristallisés, Figures 1 et 2) et de liants hydrauliques (laitiers vitrifiés).



Figure 1 : laitier cristallisé compact

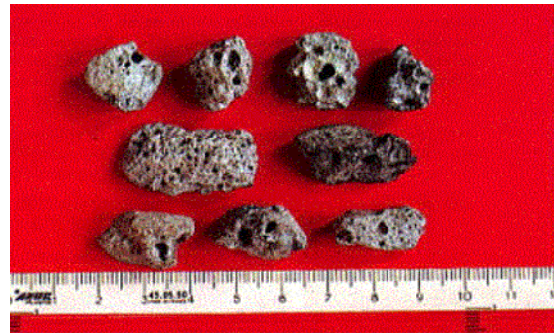


Figure 2 : laitier cristallisé poreux

(Alexandre et Sebilleau, 1988)

Le **laitier cristallisé** de haut-fourneau est élaboré selon différentes classes granulaires tout-venant, concassés 0/D et d/D selon la demande. On distingue :

- le laitier tout-venant : c'est un laitier cristallisé, de fraîche production ou non. Les granulométries sont de l'ordre de 0/300 mm, sans garantie de fuseau (Figure 3). Il s'agit plutôt d'un matériau destiné à la constitution de remblais ou de couche de forme.



Figure 3 : laitier cristallisé tout venant

(Alexandre et Sebilleau, 1988)

- le laitier concassé : c'est un laitier cristallisé concassé, livré en toutes

granulométries (Figure 4). Le laitier 0/D est dit « de compactage » lorsqu'il est criblé et calibré, mélangé ou non en proportions variables, avec du laitier granulé ou tout autre liant hydraulique. La granulométrie maximale du 0/D est de 0/50 mm ; il s'agit plutôt d'un matériau de constitution d'assises de chaussées à prise lente.



Figure 4 : Installation de concassage de laitiers de Moyeuivre-Grande (Société SLAG)

Le laitier vitrifié granulé se présente sous forme d'un sable de couleur jaune-brun de calibre 0/5 à 0/6 mm (Predis, 2001). Sa texture est liée à son mode de refroidissement. En effet, lors de sa trempe, l'énergie calorifique contenue dans le laitier en fusion provoque son explosion et forme instantanément le laitier granulé. Il est alors essoré et mis directement en stock sous forme de tas. Ce sable possède des propriétés hydrauliques naturelles qui peuvent être sensiblement améliorées par pré-broyage grossier ou broyage fin après séchage. Il peut être activé pour développer encore son hydraulicité par activation de type calcique ou sulfo-calcique.

4 Caractéristiques physico-chimiques

4.1 Analyse chimique élémentaire

Le laitier contient essentiellement quatre composés dont l'expression en oxydes représente 95 à 97 % des constituants du laitier : chaux (CaO), silice (SiO₂), alumine (Al₂O₃), magnésie (MgO). Les autres phases sont des oxydes secondaires (FeO, MnO) et des composés sulfurés.

Le Tableau 2 présente la composition chimique élémentaire moyenne du laitier :

Tableau 2 : Composition chimique élémentaire du laitier de haut-fourneau (Alexandre et Sebileau, 1988)

Composés	(%)
CaO (oxyde de calcium ou chaux)	40 à 48
SiO₂ (oxyde de silicium)	32 à 41
Al₂O₃ (oxyde d'aluminium)	9 à 18
MgO (oxyde de magnésium)	1 à 9
MnO (oxyde de manganèse)	0,4 à 0,7
FeO (oxyde de fer)	0,2 à 1
S (soufre)	0,6 à 1,5

Le Tableau 3 représente les compositions chimiques moyennes de quelques laitiers.

Tableau 3 : compositions chimiques moyennes de laitiers
(Michard et Javelle, 1968)

	Fonte Thomas de Lorraine (%)	Fonte Hématite du Nord (%)
FeO	0,5-1,0	0,9
SiO₂ (oxyde de silicium)	32-35	35
CaO (oxyde de calcium ou chaux)	41-45	36,5
MnO (oxyde de manganèse)	0,5-1,0	0,8
MgO (oxyde de magnésium)	4-6	9,5
P₂O₅ (pentoxyde de phosphore)	0,1-0,5	0,05
Al₂O₃ (oxyde d'aluminium)	15-17	13,5
CaO+ MgO/ SiO₂+ Al₂O₃	0,9-1,1	0,95
S (soufre)	0,5-1,0	1,0
CaO/ SiO₂	1,2-1,4	1,05

Une classification chimique est proposée par les normes P 18 302 et NF EN 14227-2. Elle repose sur le calcul d'un paramètre, le produit C.A, dans lequel C représente la teneur en CaO et A la teneur en Al₂O₃. Ce produit représente une réactivité potentielle du laitier, mais cette dernière propriété est également influencée par la teneur en fines et par le taux de vitrification du produit.

Trois types de laitier sont définis selon leurs caractéristiques chimiques en fonction de la valeur du produit C.A :

Tableau 4: Classification des laitiers selon le produit C.A

Produit C.A	Type (NF EN 14227-2)	Type (P18 302)
> 550	CA1	H (Hématite)
425 à 550	CA2	T (Thomas)
< 425	CA3	A (Autres)

La quasi-totalité du laitier actuellement produit et exploité en France correspond à un laitier de type CA1 selon la définition donnée par la norme NF EN 14227-2. En Lorraine, on trouvait essentiellement du type CA2.

Le diagramme de Keil, diagramme triangulaire représentant le système ternaire chaux-silice-alumine (Figure 6), permet de situer le laitier de haut-fourneau par rapport à d'autres liants utilisés en technique routière. Ce diagramme montre que les laitiers ont une composition relativement proche de celle du clinker du ciment Portland, même si celui-ci ne nécessite qu'un apport d'eau pour déclencher son hydraulité, alors que le laitier doit être activé par un apport chimique.

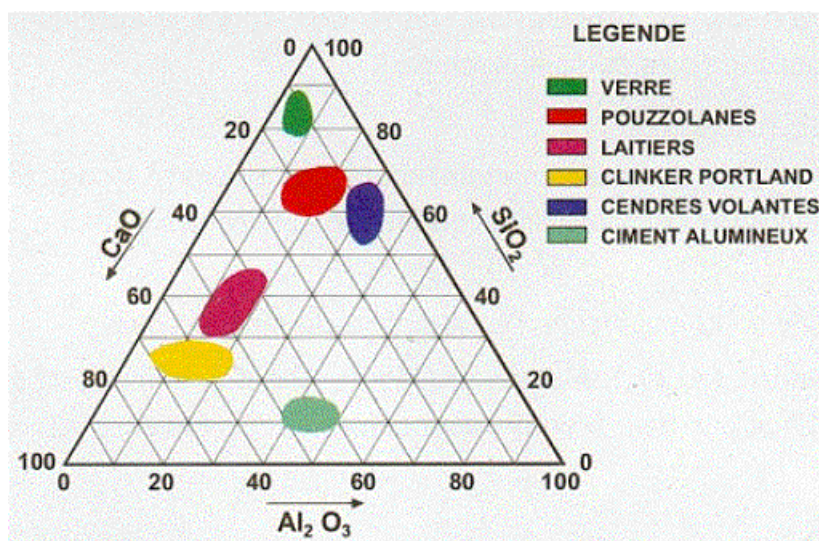


Figure 5 : diagramme de Keil

4.2 Caractéristiques minéralogiques

D'un point de vue minéralogique, les constituants des laitiers de haut-fourneau sont essentiellement des silicates ou des silico-aluminates de chaux. Il s'agit d'une forme minéralogique stable.

Laitier cristallisé : obtenu par refroidissement lent du laitier en fusion, le laitier cristallisé est composé de constituants cristallisés, essentiellement de silicate ou de silico-aluminate de chaux ainsi que des oxydes, des sulfures et exceptionnellement des nitrures issus essentiellement de la gangue et des fondants utilisés dans la matière première (minerai, fonte, acier,...). Le Tableau 5 présente les constituants des laitiers cristallisés.

Tableau 5 : constituants des laitiers cristallisés
(d'après Alexandre et Sebileau, 1988)

Désignation	Composition minéralogique	Formule simplifiée
<i>Classe des silicates</i>		
Méilite (solution solide de deux pôles minéraux : Gehlenite et Akermanite)	2 CaO – Al ₂ O ₃ – SiO ₂	C ₂ AS
	2 CaO – MgO – 2 SiO ₂	C ₂ MS ₂
Merwinite	3 CaO – MgO – 2 SiO ₂	C ₃ MS ₂
Silicate bicalcique (□ = Bredigite) (□ = Larnite) (□ = Calcio-olivine)	2 CaO – SiO ₂	C ₂ S
Rankinite	3 CaO - SiO ₂	C ₃ S ₂
Wollastonite	CaO - SiO ₂	CS
Forsterite	2 MgO - SiO ₂	M ₂ S
Enstatite	MgO - SiO ₂	MS
Monticellite	CaO – MgO - SiO ₂	CMS
Anorthite	CaO – Al ₂ O ₃ – 2 SiO ₂	CAS ₂
Diopside	CaO – MgO – 2 SiO ₂	CMS ₂
Leucite	(K ₂ O – Na ₂ O) Al ₂ O ₃ - 4 SiO ₂	(KN) AS ₄
Augite (silicate complexe)	(Ca – Mg – Fe – Ti – Al)	
<i>Classe des oxydes</i>		
Spinelles	MgO – Al ₂ O ₃	MA
	FeO – FeO ₂ 3	
Perowskite	CaO – TiO ₂	
<i>Classe des sulfures</i>		
Oldhamite	CaS	
	MnS	
	FeS	
Autres constituants possibles	Carbures – Nitrures - Thiosulfates alcalins,...	

Laitier vitrifié : l'analyse des phases par diffraction des rayons X (Alexandre et Sebileau,

1988) fait apparaître, pour le laitier vitrifié, des raies de phases cristallisées (mélilite et merwinite). L'importance de la phase amorphe dépend du degré de vitrification : sur un laitier totalement vitrifié, seule la phase amorphe est représentée.

4.3 Stabilité volumique

Tout risque d'instabilité volumique est écarté, tant pour le laitier cristallisé que pour le laitier vitrifié, car ils ne contiennent ni magnésium libre (MgO) ni calcium libre (CaO).

Toutefois, par le passé et dans certains cas exceptionnels (Alexandre et Sebileau, 1988), certains laitiers cristallisés à forte teneur en CaO pouvaient ne pas être stables. Ils se désagrégeaient alors après solidification et se transformaient en une poudre grossière (présence d'orthosilicate de calcium dont le passage de la forme \square à la forme \square s'accompagne d'une augmentation de volume de 10% environ). De tels laitiers dits « fusants » ne sont plus produits en France de nos jours.

Par ailleurs, l'éventuel risque résiduel d'instabilité volumique est encadré par les normes européennes citées au chapitre 2, qui imposent que « les *granulats de laitier de haut-fourneau refroidis dans l'air soient exempts de désintégration du silicate bicalcique* ». De plus, elles imposent que « les *granulats de laitier de haut-fourneau refroidis dans l'air soient exempts de fer instable* ».

La norme NF EN 12 620+A1 « Granulats pour béton » définit les catégories de teneur en sulfates solubles dans l'acide (AS0 pour des teneurs en sulfates solubles ≤ 1 et AS1 pour des teneurs > 1) et limite la teneur en soufre total à 2% pour les granulats de laitier de haut-fourneau refroidis dans l'air. Pour la réalisation des essais de caractérisation, ces normes se réfèrent à la norme NF EN 1744-1 relative aux essais de lixiviation pour déterminer les propriétés chimiques des granulats.

5 Caractéristiques géotechniques

Les laitiers de haut-fourneau permettent l'élaboration de granulats au sens des normes européennes granulats (NF EN 12620, 13242, 13043 et 13383) et de la norme française XP P 18-545 ou de liants hydrauliques au sens de la norme NF EN 14627-2. Les producteurs de granulats de laitier sont tenus, au même titre que les producteurs de granulats naturels, de fournir à leurs clients une fiche technique produit résumant les exigences des normes et les caractéristiques mesurées du produit. Des précisions concernant les propriétés mécaniques sont données ci-dessous, par type de laitier (cristallisé ou vitrifié).

5.1 Laitier cristallisé

Le laitier cristallisé est une roche artificielle présentant une porosité très variable, imputable essentiellement à la méthode de refroidissement. Cette variabilité de porosité a une influence sur les caractéristiques mécaniques ainsi que sur des particularités de comportement.

- **Résistance mécanique** : la résistance mécanique d'un laitier cristallisé est aussi fonction de la nature des constituants minéraux, de la dimension des cristaux, de

leur texture (imbrication des minéraux constitutifs liée aux conditions de refroidissement) et de leur dureté. Les résistances à la compression simple sur cubes de laitiers cristallisés sont habituellement comprises entre 130 et 180 MPa. Les modules d'élasticité varient de 70 000 à 95 000 Mpa.

- **Valeurs Los Angeles et MDE** : les caractéristiques de résistance à l'attrition en présence d'eau (MDE) et au choc sont très variables d'un laitier à l'autre. En effet, parmi les laitiers de haut-fourneau, on peut trouver des laitiers très durs, de catégorie routière B, voire A exceptionnellement, mais également et plus fréquemment des matériaux de caractéristiques plus faibles (catégorie D, E voire F) au sens de la norme XP P 18 545.

À titre d'exemple, les caractéristiques de plusieurs laitiers issus de différents sites sont données dans le Tableau 6 ci-dessous.

Tableau 6 : caractéristiques intrinsèques de différents laitiers cristallisés
(CETE de l'Est et Nord-Picardie)

Type de laitier	MDE	LA	PSV
Thomas	8 à 14	16 à 24	50 à 54
Crassier en exploitation : Moyeuve	11 à 15	18 à 23	50 à 56
Crassier en exploitation : Nilvange	8 à 13	15 à 22	49 à 54
Laitier Hématite fraîche production Dillingen (Allemagne)	21 à 33	34 à 49	50 à 52
Pont-à-Mousson Fraîche Production	9 à 13	19 à 30	Non connu
Cristallisés de Dunkerque	25 à 30	34 à 44	Non connu

- **Masse volumique** : la masse volumique d'un laitier cristallisé est très variable, mais en général plus élevée que celle des matériaux naturels. Les valeurs habituellement rencontrées se situent entre 2,5 t/m³ et 3 t/m³.
- **Propreté** : la difficulté à garantir les catégories de propreté superficielle habituellement requise pour les gravillons est souvent signalée. Des éléments fins issus du concassage sont piégés dans la porosité ouverte des grains, et ne sont pas éliminés par le criblage. Un lavage est nécessaire pour certains usages comme les enduits superficiels.

5.2 Laitier vitrifié

Ce type de laitier étant principalement utilisé comme liant hydraulique, les caractéristiques qui contribuent à l'obtention des propriétés mécaniques requises pour l'emploi en technique routière sont la réactivité et l'hydraulicité.

- **Réactivité du laitier** : le laitier granulé, du fait de sa structure vitreuse, est employé comme liant dans les matériaux traités aux liants hydrauliques (MTLH). Il correspond à un sable 0/5 ou 0/6,3 mm. En technique routière, il se caractérise par sa réactivité. Il peut être broyé pour augmenter sa teneur en fines et donc sa réactivité. On est alors en présence d'un laitier pré-broyé de 0/2 à 0/4 mm, avec des classes de teneur en fines définies par la norme NF P 98-106. Cet essai ne

s'applique que pour les laitiers granulés de fraîche production.

La réactivité caractérise la faculté d'attrition du laitier, c'est-à-dire son aptitude à produire des fines sous l'effet des différentes manutentions allant du transport du matériau en centrale jusqu'au compactage. Elle est définie par le coefficient α (selon la norme NF EN 13286-44), produit de la surface spécifique S (en cm^2/g) de fines inférieures à 0,08 mm et naturellement présentes, par la friabilité F obtenue par un broyage spécifique normalisé :

$$\alpha = (S.F)/1000$$

Les laitiers vitrifiés sont répartis en quatre catégories d'activité selon leur coefficient d'activité α (d'après la norme NF EN 14227-2) :

- a 1 : $\alpha < 20$
- a 2 : $20 < \alpha < 40$
- a 3 : $40 < \alpha < 60$
- a 4 : $\alpha > 60$

Plus le laitier est friable, plus la production de fines sous le compacteur est importante et plus le laitier est réactif.

La réactivité influence les performances mécaniques R_t (résistance à la traction) et E (module en traction) de la grave-laitier. La quasi-totalité du laitier granulé produit et exploité en France est de classe a2, exceptionnellement de classe a1. Du temps de l'exploitation du minerai lorrain et du fonctionnement des hauts-fourneaux, le laitier granulé produit était généralement de classe a3.

En Lorraine, certains laitiers granulés issus de fontes phosphoreuses et stockés en crassiers sont également exploités pour leurs propriétés hydrauliques résiduelles. Ces dernières ne peuvent être évaluées que par le biais d'études de performances sur graves traitées.

Une synthèse des études de traitement des sables au laitier granulé et pré-broyé (mélange d'un sable, de laitier vitrifié et d'un activant) a été réalisée par le LROP (1975). Elle met notamment en lumière l'influence de l'activité du laitier sur les caractéristiques mécaniques (le remplacement d'un laitier granulé $\alpha = 23$ par un laitier granulé $\alpha = 44$ permet une augmentation, à un an, de 50% de la résistance à la compression et de 30% de la résistance à la traction directe) ainsi que l'influence du pré-broyage dans l'amélioration des performances. Cette synthèse donne également les domaines d'utilisation de ces mélanges, ainsi que les précautions de mise en œuvre (par exemple : compactage au compacteur à pneus et non pas au cylindre vibrant).

- **Hydraulicité du laitier** : pour pouvoir développer son hydraulicité, le laitier vitrifié doit être activé par un agent basique. On peut utiliser une activation de type calcique ou de type sulfo-calcique (CaO , Ca SO_4). Les teneurs en chaux sont de l'ordre de 0,5 à 1,3%. Ces activateurs doivent respecter la norme NF P 98-107. L'indice hydraulique du laitier sert d'indication de l'activité hydraulique du laitier de haut-fourneau, à utiliser dans les ciments mélangés.

6 Caractéristiques environnementales

6.1 Acceptabilité environnementale

Un guide d'application « Laitiers sidérurgiques » d'octobre 2012, décline à ce flux le guide SETRA « Acceptabilité environnementale de matériaux alternatifs en techniques routières » de 2011.

Le guide précise les exigences environnementales applicables aux laitiers en fonction des usages en techniques routières selon trois types :

- **Type 1** : usages en sous couche de chaussées ou d'accotement d'ouvrages routiers revêtus, d'une épaisseur maximale de trois mètres de hauteur, tels que :
 - remblai sous ouvrage,
 - couche de forme,
 - couche de fondation,
 - couche de base et couche de liaison (Figure 6).

Un ouvrage routier est réputé **revêtu** si sa couche de surface est réalisée à l'aide d'asphalte, d'enrobés bitumineux, d'enduits superficiels d'usure, de béton de ciment ou de pavés jointoyés par un matériau lié si elle présente en tout point une pente minimale de 1 %.

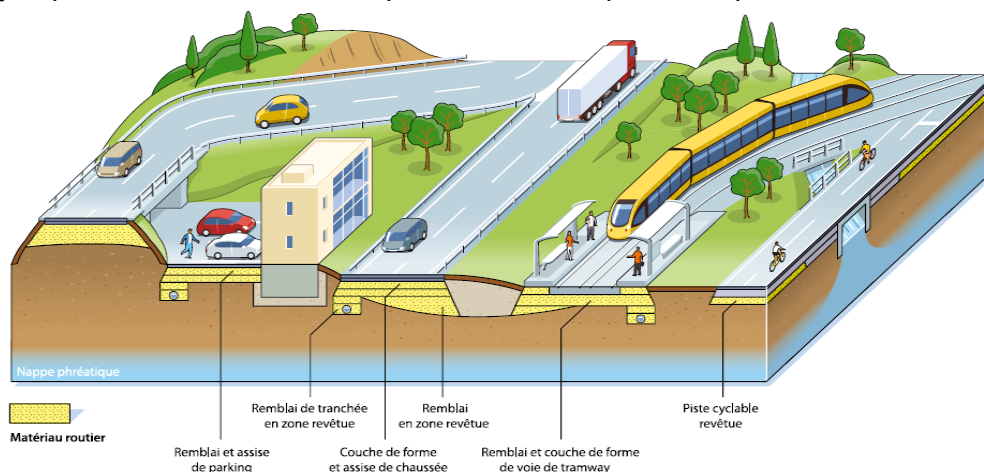


Figure 6 : usages routiers de « type 1 » (SETRA, 2012)

- **Type 2** : usages en remblai technique connexe à l'infrastructure routière (plate-forme, tranchée, merlon de protection phonique,...) ou en accotement, dès lors qu'il s'agit d'usages au sein d'ouvrages routiers **recouverts**, et dont l'épaisseur maximale n'excède pas une hauteur de six mètres. Cette catégorie comprend également les usages en sous-couche de chaussées ou d'accotement, dès lors qu'il s'agit d'usages au sein d'ouvrages routiers **revêtus** d'une épaisseur supérieure à trois mètres de hauteur, et dont l'épaisseur maximale n'excède pas une hauteur de six mètres (Figure 7). Un ouvrage routier est réputé **recouvert** si les matériaux routiers qui y sont présents sont recouverts par au moins 30 cm de matériaux naturels ou équivalents et si, en tout point de son enveloppe extérieure, la pente minimale est de 5 %.

Usages routiers "type 2"

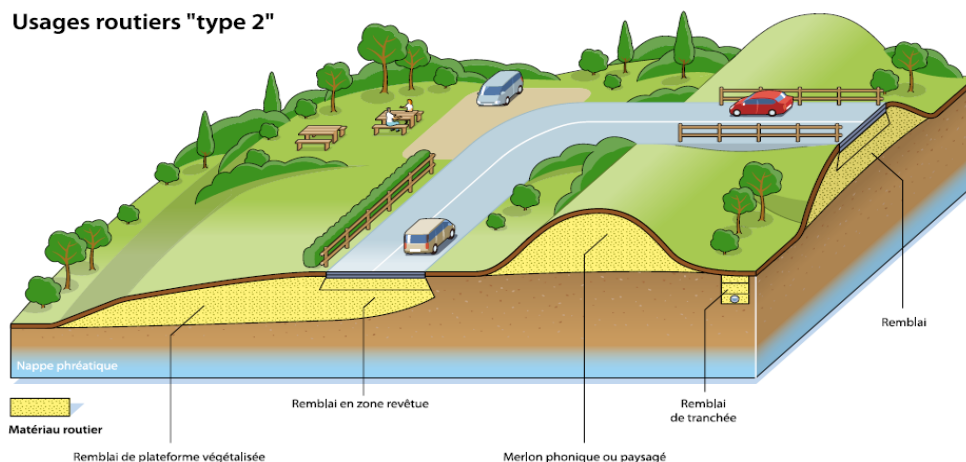


Figure 7 : usages routiers de « type 2 » (SETRA, 2012)

- **Type 3 (Figure 8)** : Il correspond aux usages suivants
 - sous couche de chaussée ou d'accotement, au sein d'ouvrages routiers revêtus ou non revêtus,
 - remblai technique connexe à l'infrastructure ou en accotement, au sein d'ouvrages routiers recouverts ou non recouverts,
 - en couche de roulement (enduits superficiels, bétons bitumineux,...)
 - en remblai de préchargement nécessaire à la construction d'une infrastructure routière,
 - en système drainant (tranchées, éperons, chaussée réservoir).

Usages routiers "type 3"

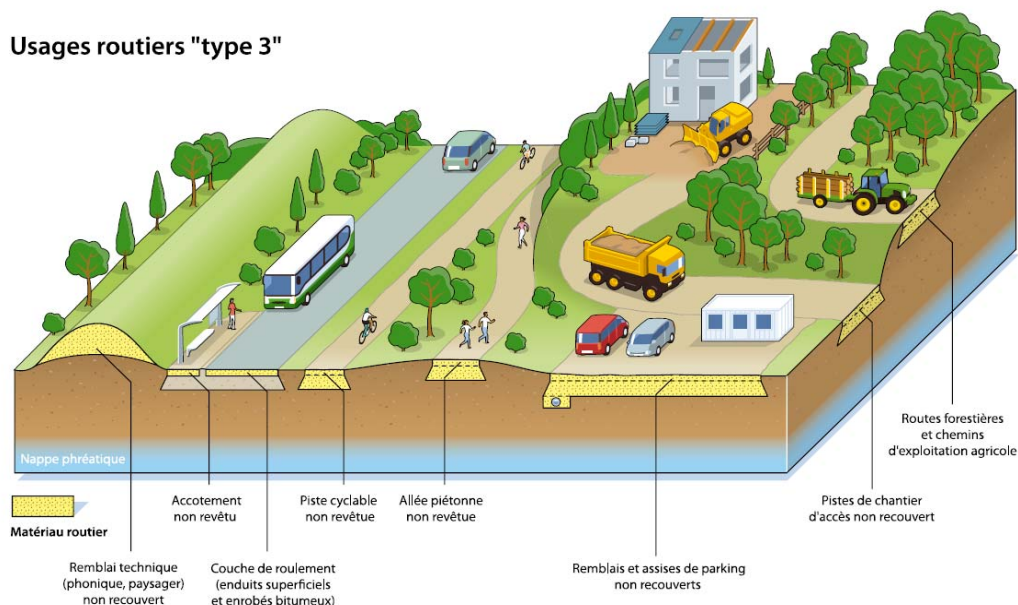


Figure 8 : usages routiers de « type 3 » (SETRA, 2012)

Cette catégorie comprend également l'utilisation des matériaux pour la construction de :

- pistes de chantier,
- routes forestières,
- chemins d'exploitation agricole,
- chemins de halage.

Des seuils d'acceptabilité sont donnés pour chaque type d'usage (tableau 7) et des limitations sont formulées en fonction de l'environnement immédiat (tableau 8).

Ces recommandations ne concernent que les matériaux élaborés à partir de laitiers sidérurgiques cristallisés (elles ne s'appliquent pas aux laitiers vitrifiés).

Tableau 8 : valeurs limites à respecter pour les différents usages routiers (SETRA, 2012)

Paramètres (lixiviation NF EN 12457-4)	Valeur limite à respecter (en mg/kg de matière sèche)		
	Usages routiers de « Type 1 »	Usages routiers de « Type 2 »	Usages routiers de « Type 3 »
As (Arsenic)	0,6		
Ba (Baryum)	36	25	
Cd (Cadmium)	0,05		
Cr total (Chrome total)	4	2	0,06
Cr^{VI} (Chrome hexavalent)	1,2	0,6	-
Cu (Cuivre)	3		
Hg (Mercure)	0,01		
Mo (Molybdène)	5,6	2,8	0,6
Ni (Nickel)	0,5		
Pb (Plomb)	0,6		
Sb (Antimoine)	0,08		
Se (Selenium)	0,5	0,4	0,1
Zn (Zinc)	5		
F⁻ (Florures)	60	30	13
Cl⁻ (Chlorures)	10000	5000	1000
SO₄²⁻ (Sulfates)	10000	5000	1300

Tableau 9 : Usages routiers autorisés et limitations (SETRA, 2012)

Tableau 9 : Usages routiers autorisés et limitations (SETRA, 2012)

Nature des usages routiers	Limitations liées à l'environnement immédiat	Limitations liées à la mise en œuvre
<p>Type 1</p> <hr/> <p>Type 2</p>	<p>Sauf avis contraire d'un hydrogéologue expert, l'utilisation des matériaux alternatifs est interdite :</p> <ul style="list-style-type: none"> • dans les zones inondables et à moins de 50 cm des plus hautes eaux cinquantennales ou, à défaut des plus hautes eaux connues • à moins de 30 m de tout cours d'eau, y compris lacs et étangs. Cette distance est portée à 60 m si l'altitude du lit du cours d'eau est inférieure de plus de 20 m à celle de la base de l'ouvrage et dans les zones désignées comme zones de protection des habitats, des espèces, de la faune et de la flore sauvage en application de l'article L.414-1 du code de l'environnement. • Dans les périmètres de protection rapprochées (PPR) des captages d'alimentation en eau potable (AEP) • dans les zones couvertes par une servitude d'utilité publique, en application de l'article L.211-12 du code de l'environnement, au titre de la protection de la ressource en eau • dans les zones de karsts affleurants <p>L'utilisation des matériaux alternatifs est interdite dans les parcs nationaux</p>	<p>Capacité de stockage temporaire limitée à 1000 m³</p> <p>Au-delà de 1000 m³, avis d'un hydrogéologue-expert</p>
<p>Type 3 si pH ≤ 12</p>	<p>L'utilisation des matériaux alternatifs est interdite dans les parcs nationaux</p>	
<p>Type 3 si pH > 12</p>	<p>Sauf avis contraire d'un hydrogéologue expert, l'utilisation des matériaux alternatifs est interdite :</p> <ul style="list-style-type: none"> • à moins de 30 m de tout cours d'eau, y compris lacs et étangs. Cette distance est portée à 60 m si l'altitude du lit du cours d'eau est inférieure de plus de 20 m à celle de la base de l'ouvrage et dans les zones désignées comme zones de protection des habitats, des espèces, de la faune et de la flore sauvage en application de l'article L.414-1 du code de l'environnement. • Dans les périmètres de protection rapprochées (PPR) des captages d'alimentation en eau potable (AEP) • dans les zones couvertes par une servitude d'utilité publique, en application de l'article L.211-12 du code de l'environnement, au titre de la protection de la ressource en eau • dans les zones de karsts affleurants <p>L'utilisation des matériaux alternatifs est interdite dans les parcs nationaux</p>	<p>Pas de limitations</p>

Par ailleurs, le programme européen SESAR (StEel Slag roAd and enviRonment) s'est intéressé à l'identification des éléments potentiellement lixiviables et à leurs mécanismes de relargage. Cette expérimentation menée sur différentes familles de laitiers de l'Est de la France et d'Allemagne met en évidence certains couplages physico-chimiques et en particulier les corrélations existantes entre conditions de pH et solubilisation des sulfates et ions Ca pour les laitiers HF.

6.2 Effets sur les éco-systèmes

Les seules données disponibles sur ce sujet sont celles communiquées par la Société Lorraine d'Agrégats (SLAG, 2002). Celle-ci a fait réaliser plusieurs types de tests sur des laitiers de haut-fourneau issus de ses sites de production de fonte phosphoreuse (Nilvange, Auboué, et Moyeuve), en vue d'une utilisation en remblai dans les zones humides et inondables. Suivant la classification de la directive européenne 91/689/CEE du 12 décembre 1991 applicable à l'époque de l'étude (puis abrogée par l'article 41 de la directive n° 2008/98/CE du Parlement européen), ces laitiers pouvaient être qualifiés de type H14, c'est-à-dire « écotoxiques ». Les laitiers ont donc subi une série de tests de deux types : analyses chimiques (contenu total, lixiviation, percolation) et essais d'écotoxicité, dont les paramètres sont détaillés dans le Tableau 9.

Tableau 9 : tests d'écotoxicité réalisés (SLAG, 2002)

Support	Type de toxicité	Espèces utilisées	Réponse observée	Valeurs seuils de la population touchée	Normes applicables en 2002
Matériau brut	chronique	Végétaux supérieurs	inhibition de la croissance aérienne	50 %	ISO 11269/2
	aiguë	Vers de terre	immobilisation	50 %	NF X 31-251
Lixiviat	aiguë	Vibrio fischeri (poisson)	immobilisation	50 %	XP T 90-320
		Daphnia magna	immobilisation	50 %	NF EN ISO 6341
	sub-chronique	Raphidocelis subcapitata (algue)	inhibition de la croissance	20 %	NF 28692
		Ceriodaphnia dubia	inhibition de la croissance aérienne	20 %	US/EPA agence de l'eau

6.3 Suivi environnemental

Un projet de recherche a été conduit par le CTPL avec les industriels sidérurgistes afin de caractériser le relargage des laitiers dans le cadre de dispositifs routiers expérimentaux, avec financement de l'ADEME (2007-2009). Un dispositif concernait les laitiers HF. Toutefois, de nombreuses incertitudes pèsent sur la qualité du dimensionnement et du suivi des dispositifs, rendant non concluants les résultats obtenus.

7 Aspects sanitaires

En dehors de dispositions réglementaires en matière de maîtrise des émissions de poussières en installations industrielles, il n'existe pas de dispositions spécifiques qui concernent les laitiers de haut-fourneau.

8 Usages (Types d'infrastructures)

Les caractéristiques mécaniques minimales imposées aux granulats entrant dans la composition des produits sont définies par les normes « produit » (NF EN 12620, 13242, 13043 et 13383...). Des guides d'application des normes permettent d'imposer des caractéristiques supérieures aux exigences minimales des normes selon les trafics, la position des couches et les produits. Le laitier de haut-fourneau cristallisé est insensible à l'eau lors de sa mise en œuvre.

8.1 Utilisation en remblai ou en couche de forme

La norme NF P 11 300 (Exécution des terrassements - Classification des matériaux utilisables dans la construction des remblais et des couches de forme d'infrastructures routières) et le guide technique LCPC/SETRA (Réalisation des remblais et des couches de forme) classent les laitiers de haut-fourneau dans la catégorie des sous-produits industriels F avec le symbole F8.

En remblai, selon leur granulométrie, les laitiers cristallisés de haut-fourneau peuvent être assimilés à des matériaux D2 ou D3. En couche de forme, d'après leurs caractéristiques de LA (\square 45) et de MDE (\square 45), ils peuvent être classés D21 ou D31.

L'utilisation tout venant pour remblai, moins noble, a pratiquement disparu en raison de la diminution des ressources.

8.2 Utilisation en assises de chaussées

Le laitier cristallisé et concassé est employé comme granulats dans les couches d'assises de chaussées (GNT) ou en association avec des liants hydrauliques ou hydrocarbonés.

- **Graves hydrauliques, graves non traitées et bétons hydrauliques/laitier concassé**

Le laitier concassé est utilisé plus fréquemment comme granulats dans les graves traitées aux liants hydrauliques, quel que soit le liant utilisé (ciment, liant routier, cendres, laitier vitrifié), que dans les enrobés. Lorsque le liant est constitué de laitier vitrifié, le mélange est désigné sous le nom de grave-laitier-tout-laitier (GLTL).

Le laitier cristallisé est également utilisé sous forme de grave non traitée (GNT) pour les assises et plate formes, si les propriétés mécaniques sont suffisantes.

A l'époque de l'utilisation massive de laitiers de fraîche production, la technique de laitier 0/D « clainé » a été couramment employée pour la réalisation d'assises de chaussées, avant l'avènement de la technique « Grave laitier », mais a perduré jusqu'au début des années 1990. Le principe consistait à mélanger du laitier cristallisé 0/D avec du laitier granulé, dans des proportions allant jusqu'à 30 %, et d'effectuer une humidification à la mise en œuvre. Ces laitiers clainés développent une prise progressive dans le temps sans activation particulière. Au compactage, le laitier granulé, ne remplissant que les vides du laitier concassé, ne diminue pas le coefficient de frottement élevé de ce matériau, ce qui assure une bonne stabilité mécanique. Sous l'effet de la circulation, le laitier granulé, qui joue le double rôle de sable et de liant hydraulique, assure une bonne liaison entre les granulats de laitier concassé. Il en résulte la transformation progressive de la chaussée en une dalle monolithique, résistante et homogène.

Le laitier concassé peut également être utilisé pour la fabrication de béton à usage routier.

- **Liants hydrauliques routiers /Laitier vitrifié**

En technique routière, le laitier vitrifié est utilisé essentiellement comme liant pour la réalisation d'assises de chaussées sous la forme de graves traitées classées en G1, G2, G3 ou G4, ou de sables traités classées en S0, S1, S2, S3, S4 ou S5 (NF EN 14227).

Le laitier vitrifié est utilisé le plus couramment comme liant sous forme de laitier granulé ou de laitier granulé pré-broyé. La technique de pré broyage le rend plus réactif et permet ainsi d'économiser sensiblement, à performance équivalente, la ressource.

Outre leur utilisation dans l'industrie cimentière, les laitiers vitrifiés sont valorisés pour la confection de liants hydrauliques routiers conformes à la norme NF P 15-108. Les liants routiers sont couramment utilisés pour les techniques d'assises traitées aux liants hydrauliques, mais également en traitement de sols. Ils sont obtenus par mélanges et broyage de co-produits de l'industrie (dont les laitiers vitrifiés), d'activants de type chaux, sulfates, cendres volantes, voire de clinker.

Les performances des matériaux traités sont généralement voisines de celles obtenues avec des ciments normalisés pour des dosages équivalents, avec un avantage sensible pour les liants routiers quant aux délais de maniabilité, du fait d'une cinétique plus lente que celle des ciments classiques.

8.3 Utilisation en couches de surface

Les granulats de laitier concassé, par leur angularité, leur rugosité et selon leurs propriétés mécaniques mesurées, conviennent pour la fabrication des enrobés hydrocarbonés, y compris pour la réalisation des couches de surface (couches de roulement et de liaison). En effet, les caractéristiques du laitier n'évoluent pas avec l'usure, puisqu'elles sont dues à la micro-porosité du laitier cristallisé. Dans l'Est de la France, le laitier concassé est depuis longtemps couramment employé dans les couches de roulement.

La porosité des granulats de laitier conduit généralement le formulateur d'enrobés à majorer de 0,1 à 0,3% la teneur en liant bitumineux, par rapport aux dosages conventionnels avec des granulats naturels peu poreux.

Certains problèmes sont communs à l'ensemble des laitiers sidérurgiques ; ils sont décrits ci-après. Un phénomène de "soupe" peut apparaître lorsqu'il y a surchauffe des granulats par vaporisation de l'eau incluse dans le granulat avant l'enrobage. Cet inconvénient peut être totalement éliminé en diminuant la température de séchage des granulats (140° au maximum). Le phénomène n'est pas préjudiciable à la tenue dans le temps de l'enrobé. Il nécessite seulement de différer le compactage après stabilisation des matériaux. Il est aussi nécessaire de majorer de 0,3 ppc la teneur en liant bitumineux, par rapport aux dosages conventionnels des enrobés avec granulats naturels, pour tenir compte de la forte densité des granulats de laitiers d'aciérie.

La dispersion de la porosité peut engendrer des écarts de la Masse Volumique Réelle (MVR) des granulats, qui conduisent à des difficultés de fixation des objectifs de densification pour les enrobés, graves traitées au liant hydraulique ou graves non traitées. Il serait nécessaire de fixer des fourchettes de densification et d'évolution tenant compte des MVR mini et maxi des constituants. Cette technique s'est particulièrement bien

développée dans tous les bassins sidérurgiques de la Lorraine, essentiellement issus de haut-fourneau.

8.4 Usages non routiers

- Industrie cimentière et bétons

Les laitiers vitrifiés constituent un composant important de l'industrie cimentière et permettent de réaliser de nombreux ciments normalisés de construction. Ils sont obtenus par mélanges et broyage de co-produits de l'industrie, d'activants de type chaux, sulfate, cendres volantes voire de clinker.

Le laitier vitrifié est principalement utilisé dans la production de ciment, en remplacement du clinker, dans les catégories CEM II et CEM III (jusqu'à 95 %) destinées notamment à la réalisation de bétons en milieux agressifs (alcalin ou marin) où sa présence favorise la résistance à l'alcali-réaction et protège les armatures (CTPL, 2009).

Les laitiers cristallisés présentent certaines caractéristiques mécaniques conférant aux bétons de laitiers des propriétés particulières. La résistance mécanique élevée associée à une conductivité thermique faible permettent en particulier (à épaisseur égale) de réaliser des bétons deux fois plus isolants que les bétons classiques, ce qui représente un avantage indéniable pour la protection au feu des aciers de structure (CTPL, 2009).

- Autres usages (CTPL, 2009)

Le laitier vitrifié, qui est de moins en moins employé comme sable dans la construction, est largement utilisé dans l'industrie du verre comme source d'alumine et de silice. Sa contribution dans le traitement de surface des métaux, où il est utilisé comme grenaille, n'est pas négligeable. Il remplace avantageusement le sable naturel tout en procurant un avantage sanitaire grâce à l'absence de silice libre (CTPL, 2009).

Si la production de laitiers cristallisés reprend, des pistes de valorisations diversifiées existent en modifiant la méthode de refroidissement. Il est en effet possible d'obtenir un granulats léger normalisé dont l'utilisation dans les bétons de structure permet de réduire les charges et donc les fondations des ouvrages. Cette caractéristique pourrait être un facteur important d'économie dans les immeubles de grande hauteur.

9 Références bibliographique

9.1 Publications

Alexandre J., Sebilleau J.L, 1988. « Le laitier de haut-fourneau : élaboration, traitements, propriétés, emplois. » C.T.P.L. (Ed), Paris, France, 340 pages.

Bruncher P., 2002. « Des laitiers cristallisés de haut-fourneau pour un pont en Moselle. » Laitiers sidérurgiques n°82 (Ed.), France, Juin, pp 8-22.

Martins, 2003.. « Demande d'autorisation de la société Granufos. » Rapport de l'Ingénieur de l'Industrie et des Mines Bordereau préfectoral N°50-2002 A, 6 pages.

Michard J., Javelle P, IRSID (Institut de Recherches de la SIDérurgie), 1968. « Le haut-fourneau moderne et son rôle dans la production de laitier. » L.C.P.C. (Ed), France. Bulletin de liaison n°33, référence 542, p 85 à 104.

Pérême J., CTPL 2002. « Vitified blast furnace slag : Granulated or pelletised. Proceedings." The 3rd European slag conference, 2-4th october 2002, Keyworth. (ed) EUROSLAG publication n°2, pp 31-35.

SOLLAC, 1975. « Sidérurgie générale. » Tome 1 (du minerai à l'acier), 315 pages.

9.2 Documents techniques

Astesan A., 1975. « Synthèse des études de traitement des sables au laitier granulé & prébroyé. » L.R.O.P.

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

SETRA-LCPC, 1998. « Réseau routier national. Catalogue des structures types de chaussées neuves.»

SETRA – Acceptabilité environnementale de matériaux alternatifs en techniques routières – Evaluation environnementale – Mars 2011

SETRA – Acceptabilité environnementale de matériaux alternatifs en techniques routières – Les laitiers sidérurgiques – Octobre 2012

CETE de l'Est - Guides d'utilisation des matériaux lorrains en technique routière – Guide laitier de haut fourneau , Février 2010

CETE Nord-Picardie - Filières de valorisation des déchets du BTP et des Co-produits industriels de la région Nord-Pas de Calais – Guide d'aide à la décision à destination des Maîtres d'Ouvrage, Maîtres d'Oeuvre et Bureaux de Contrôles – CRGV – Mars 2011

PREDIS Nord Pas-de-Calais – Groupe de Travail n°5 “Améliorer la valorisation des déchets industriels en BTP” – Guides Techniques Régionaux relatifs à la valorisation des déchets et co-produits industriels CETE Nord Picardie/Ecole des Mines de Douai, Juillet 2002

Bibliographie de l'étude spécifique pour la validation et l'utilisation de laitiers de haut-fourneau « La construction de la L.G.V. EST » :

- LCDI – 2002. « Evaluation des contaminations et des potentialités écotoxicologiques sur un échantillon intitulé "laitier de Auboué". » Rapport d'analyses et d'essais.
- LCDI –2002. « Evaluation des contaminations et des potentialités écotoxicologiques sur un échantillon intitulé "laitier de Nilvange". » Rapport d'analyses et d'essais.
- LERM – 2001. « Caractérisation physico-chimique et contrôle d'un laitier cristallisé. Laitier cristallisé d'Auboué. »

SLAG (Société Lorraine d'AGrégats), 2002. « Dossier technique pour avis technique et validation concernant l'utilisation des matériaux de laitier de haut-fourneau issu de la fabrication de la fonte phosphoreuse en remblai dans les zones humides et inondables. »

9.3 Normes

NF P 11 300, 1992. Exécution des terrassements - Classification des matériaux utilisables dans la construction des remblais et des couches de forme d'infrastructures routières, AFNOR (Ed), Paris, France, Norme française, 21 p.

NF P 15 108, 2000. Liants hydrauliques - Liants hydrauliques routiers - Composition, spécifications et critères de conformité. AFNOR (Ed), Paris, France, Norme française, 13 p.

NF P 18 306, 1965. Bétons de construction - Laitier granulé. AFNOR (Ed), Paris, France, Norme française, 3 p.

NF P 18 307, 1965. Bétons - Laitier expansé. AFNOR (Ed), Paris, France, Norme française, 1 p.

NF P 18 506, 1992. Additions pour béton hydraulique - Laitier vitrifié moulu de haut-fourneau. AFNOR (Ed), Paris, France, Norme française, 4 p.

NF EN 14227-1, 2005. Mélanges traités aux liants hydrauliques - Spécifications - Partie 1 : mélanges granulaires traités au ciment - Tirage 2, AFNOR (Ed), Paris, France, 32 p.

NF EN 14227-2, 2005. Mélanges traités aux liants hydrauliques - Spécifications - Partie 2 : mélanges traités au laitier . AFNOR (Ed), Paris, France, 43 p.

NF EN 14227-3, 2005. Mélanges traités aux liants hydrauliques - Spécifications - Partie 3 : mélanges traités à la cendre volante . AFNOR (Ed), Paris, France, 40 p.

NF EN 14227-5, 2005. Mélanges traités aux liants hydrauliques - Spécifications - Partie 5 : mélanges traités au liant hydraulique routier . AFNOR (Ed), Paris, France, 31 p.

NF EN 13286-44, 2003. Mélanges traités et mélanges non traités aux liants hydrauliques - Partie 44 : méthode d'essai pour la détermination du coefficient alpha du laitier vitrifié de haut fourneau. AFNOR (Ed), Paris, France, 12 p.

NF P 98 107, 2009. Assises de chaussées - Activation du laitier vitrifié - Définitions, caractéristiques et spécifications. AFNOR (Ed), Paris, France, Norme française, 14 p.

9.4 Sites internet

CTPL (Comité Technique pour la Promotion des laitiers sidérurgiques) :
<http://www.ctpl.info>

AFOCO (Association Française des Opérateurs sur CO-produits industriels : <http://www.afoco.org>)

EUROSLAG (Association européenne des producteurs, transformateurs et utilisateurs de laitiers): <http://www.euroslag.com>

10 Auteurs et relecteurs

Auteurs OFRIR1	Chantal Godmel (CETE Est)
Relecture d'experts OFRIR1	Jean-Claude Auriol (LCPC), Yves Brosseaud (LCPC), François de Larrard (LCPC), Jérémie Domas INERIS), Guillaume Gay (INERIS), Vincent Lédée (LCPC), Michel Legret (LCPC), Patrice Piantone (BRGM)
Relecture comité de pilotage	Laurent Château (ADEME), Pierre Dupont (SETRA), Agnès Jullien (LCPC), Alain Millotte (ADP), Jacques Pereme (CTPL)
Auteurs OFRIR2	Hervé Coulon (CETE Nord-Picardie)
Relecture d'experts OFRIR2	Laurent Château (ADEME), Guillaume Gay (INERIS)
Relecture bureau	Laurent Château(ADEME), Agnès Jullien (IFSTTAR)
Date de mise en ligne, version finale	17 juin 2013