

VALORISATION DES MATERIAUX ALTERNATIFS EN TECHNIQUE ROUTIERE : amélioration de la connaissance sur le potentiel de gonflement des laitiers de convertisseurs

VALORISATION OF ALTERNATIVE MATERIALS IN ROAD ENGINEERING: a laboratory approach for the swelling characterisation of BOF Slag

Samyr EL BEDOUI

¹ CEREMA Est – Laboratoire de Nancy, 71 rue de la grande haie 54510 Tomblaine - France

RÉSUMÉ – La valorisation des matériaux dits "alternatifs" est au cœur des enjeux actuels pour la préservation des ressources naturelles non renouvelables. Nous présentons les travaux menés en laboratoire sur la caractérisation du gonflement des laitiers de convertisseur, co produits des industries sidérurgiques.

ABSTRACT – The valorisation of alternative materials is considered as a solution to preserve natural resources. Our work deals with a laboratory approach performed to characterise BOF slag. The objective is the characterisation of swelling phenomenon due to lime content. A best knowledge will allow a most important and secure valorisation rate.

1. Introduction

Dans le domaine des travaux publics, la réussite des opérations de terrassements réalisées pour les projets d'infrastructures nécessite l'optimisation des mouvements de terre en valorisant au mieux les déblais afin de minimiser les emprunts extérieurs. Ceci impose souvent la réutilisation de sols aux propriétés intrinsèques défavorables qui peuvent être accentuées par les conditions météorologiques lors de la réalisation du chantier. En France, la réalisation de ces opérations est guidée par deux ouvrages de référence : le guide de réalisation des remblais et couche de forme (GTR ; SETRA, 1992) et le guide traitement des sols (GTS ; SETRA-LCPC, 2000). Sur la base d'une classification géotechnique des matériaux, ils permettent de fournir un cadre technique commun à tous les acteurs du secteur, en proposant, entre autre, des grilles de décision indiquant des solutions d'amélioration des sols par traitement (chaux et/ou liant hydraulique) par exemple.

Dans le cas où ces approches ne sont pas techniquement ou financièrement opportunes, la solution requise est le recours aux matériaux d'emprunt en substitution. Compte tenu des objectifs nationaux de réduction des emprunts de ressources naturelles (lois Grenelle I et II, loi de transition énergétique) associés à l'émergence du concept d'efficacité, ces substitutions sont une voie de valorisation de matériaux dits « alternatifs ».

Les travaux faisant l'objet de cet article portent sur les co-produits non métalliques issus des filières de production d'acier dites « oxygène ». Ces matériaux se caractérisent par de fortes teneurs en chaux libre qui peuvent aboutir à des expansions volumiques freinant leur emploi (hydratation de CaO) dans certains domaines du génie civil (chaussées, bâtiment...).

2. Filière de production et spécificités

Les laitiers d'aciérie de convertisseur à oxygène (LAC) sont issus de l'affinage de la fonte en acier. Ce process a pour but d'éliminer la plus grande quantité possible d'impuretés dans la fonte préalablement produite (élimination des éléments non métalliques, il s'agit en particulier de favoriser la décarbonatation et la déphosphoration). Le principe est d'injecter de l'oxygène pur sous haute pression (quelques bars, en fonction du procédé) au mélange fonte et ferraille d'apport en fusion (température > 1500°C). De la chaux est ajoutée au mélange afin de favoriser la purification de la fonte. Les LAC en fusion sont stockés dans des fosses et refroidis à l'air ou par voie humide. Les étapes d'élaboration des LAC en granulats sont les suivantes :

- déroctage (brise roche hydraulique) et déferrailage,
- scalpage,
- concassage,
- criblage.

La Figure 1 présente une synthèse des caractéristiques chimiques générales des LAC en comparaison avec les autres familles de laitier ainsi que des roches massives classiquement utilisées en géologie appliquée. Les travaux de Belhadj et al (2010) ont montré que les principales phases minérales observées sont la Bélite/Larnite, des ferrites de Calcium. Une de leur caractéristique est la **forte teneur en chaux libre** (CaO) et magnésie libre (MgO). Ces matériaux peuvent donc présenter des **problèmes d'instabilités volumiques** lors de l'hydratation de CaO, selon la réaction chimique suivante :

$\text{CaO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Ca(OH)}_2$, avec une expansion volumique d'un facteur 2.

Ce risque d'expansion limite fortement l'usage de ces produits car il aboutit à des déstructurations d'ouvrage comme l'illustre la Figure 2.

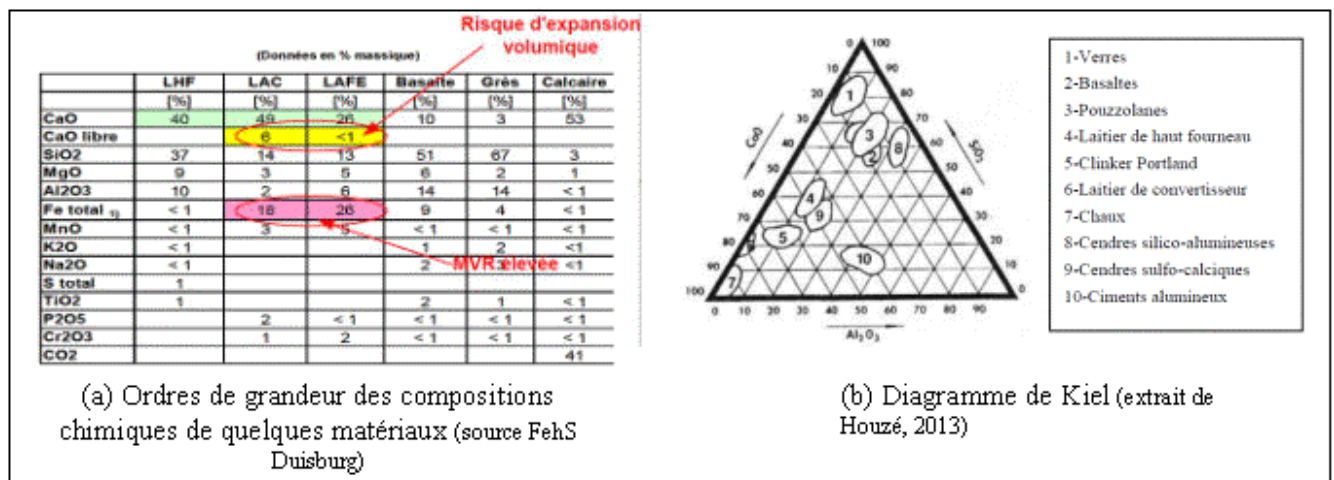


Figure 1: (a) caractéristiques chimiques générales des laitiers sidérurgiques (source : FehS) ; (b) diagramme de Kiel (extrait de Houzé, 2013).



Figure 2: exemples de désordres dus à des gonflements de LAC.

Néanmoins, comme le montre la Figure 3, ces co-produits présentent un réel intérêt en génie civil car ils ont des propriétés géotechniques intéressantes : résistances à la fragmentation (essai LOS ANGELES ; AFNOR, 2011) et à l'usure (essai MICRO DEVAL ; AFNOR 2011) élevées, proches des roches naturelles éruptives. De plus, leurs fortes teneurs résiduelles en fer (Figure 1) donnent des masses volumiques importantes, intéressantes dans des applications de stabilisation de talus en masques poids.

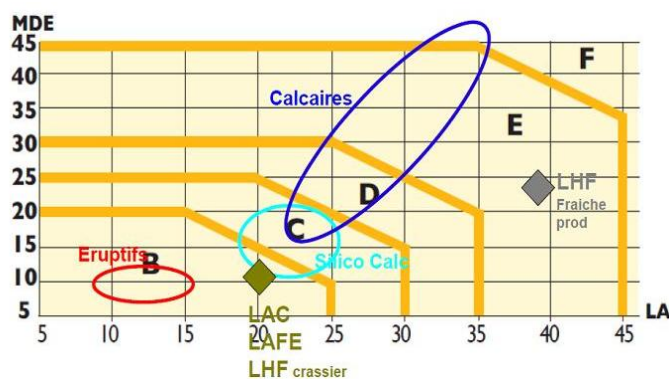


Figure 3: caractéristiques géotechniques des laitiers sidérurgiques (modifié de AFNOR, 2011).

Afin d'élargir le champ d'application de ces produits, des techniques d'inertage des produits ont été développées. Ces approches concernent les différentes étapes de la production des LAC :

- à la fabrication : ajout de sable au laitier encore en fusion (procédé Thyssen),
- au stockage : l'objectif étant de favoriser l'hydratation pendant la phase de stockage afin de minimiser les risques de gonflement après la mise en œuvre du LAC (Auriol et al, 2006 ; Da Silveira et al, 2005),
- à l'élaboration : fabrication de mélange 100% LAC avec une granulométrie permettant de limiter les gonflements, ou fabrication de mélanges associant LAC et matériaux inertes (Auriol et al, 2006 et Rayssac et al, 2009).

Parmi ces techniques, aucune n'est en mesure de garantir une sécurisation totale de leur emploi dans des conditions techniques et industrielles optimisées.

Afin de minimiser le risque de dégât par gonflement, il est nécessaire de disposer de méthodes de caractérisation du potentiel de gonflement adaptées: (1) au contrôle de la production; à la quantification du gonflement (2) absolu et (3) dans l'ouvrage.

Actuellement, la quantification en laboratoire du potentiel de gonflement est basée sur l'essai d'expansion vapeur (NF EN 1744-1 ; AFNOR, 2014).

Son principe est basé sur la mesure du gonflement axial d'un échantillon 0/22.4mm (recomposé selon une courbe granulométrique théorique, dite de Füller), compacté à la table vibrante, soumis un flux ascendant de vapeur durant 7 jours (Figure 4).

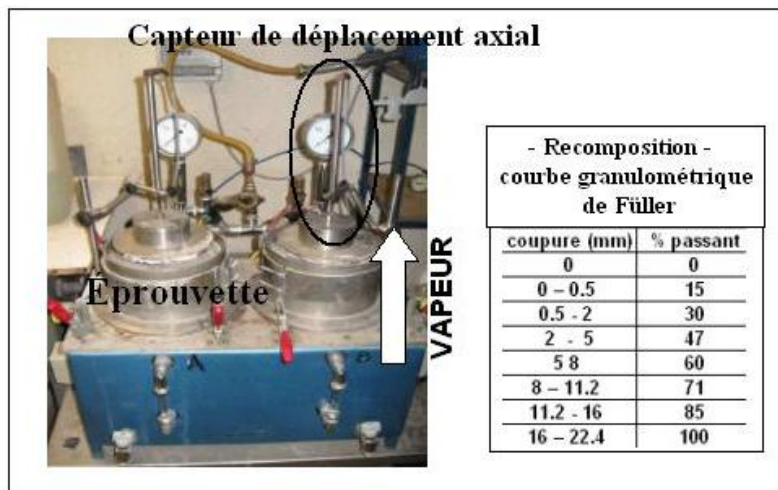


Figure 4: essai d'expansion vapeur (NF EN 1744-1) – (a) appareil de mesure – (b) recomposition de la courbe granulométrique.

Les seuils d'utilisation sont prescrits en fonction des usages:

- < 5%: usage en couche de forme,
- <3.5%: usage en assise de chaussées.

Deux inconvénients subsistent: (i) la granulométrie est recomposée (la granulométrie testée est fortement différente de celle du matériau mis en œuvre), et (ii) l'état de compaction des éprouvettes n'est pas lié aux prescriptions de compactage sur chantier.

3. Méthodologie et essais de laboratoire

Les travaux faisant l'objet du présent article portent sur une démarche expérimentale menée en laboratoire qui avait pour objectifs :

- (i) d'étudier la sensibilité du résultat d'essai en fonction de la méthode de compactage et des conditions expérimentales d'hydratation,
- (ii) l'influence des coupures granulométriques sur le résultat de l'essai.

3.1 Influence du compactage et du mode d'hydratation

Dans un premier temps, nous avons basé notre approche sur un échantillon de LAC (nommé LAC n°1 dans l'article) d'environ 100kg. L'échantillon a été brassé et homogénéisé manuellement avant d'être soumis à la série d'essais.

Pour les essais en immersion, nous avons réalisé des éprouvettes dans des moules CBR selon des modalités de compactage « proctor modifié » (AFNOR, 1999) afin d'avoir l'énergie de référence la plus élevée. Elles ont été mises en immersion dans l'eau à température ambiante pendant une période de 18 à 23 jours. Le gonflement axial final a été mesuré via un comparateur vertical (AFNOR, 1997).

Pour l'ensemble des essais, nous disposons des valeurs de masse volumique apparente (notée m_{va} , en t/m^3) et de gonflement axial (noté G pour le gonflement vapeur et G_{imm} pour le gonflement par immersion, en %). La comparaison entre les différentes valeurs obtenues avec la valeur de référence (notée G_{ref} , obtenue selon la norme NF EN 1744-1 ; AFNOR, 2014) permet d'étudier les influences des modes d'hydratation et de la compacité sur le résultat de l'essai.

3.2 Influence des coupures granulométriques

Dans un deuxième temps, l'étude de l'influence des coupures granulométriques sur le résultat de l'essai a été menée sur un échantillon de LAC différent (nommé LAC n°2). Le prélèvement d'environ 250kg a été brassé et homogénéisé selon la même méthode que lors de la première phase. Dans cette partie, l'ensemble des mesures de gonflement a été réalisé avec le dispositif à la vapeur décrit dans la norme NF EN 1744-1. Les durées d'essai ont été réduites à 96h afin d'optimiser le planning expérimental. Les éprouvettes ont été réalisées en introduisant les discontinuités granulométriques suivantes dans la courbe théorique de Füller: 0/5, 2/8, 5/11 et 10/22mm.

4. Résultats – Interprétation

4.1 Influence du compactage et du mode d'hydratation

Deux séries d'éprouvettes du LAC n°1 ont été confectionnées selon la courbe granulométrique théorique de Füller 0/22.4 mm et à la table vibrante. Le résultat de gonflement moyen obtenu est de 2 ± 0.2 %. Cette valeur moyenne est retenue comme référence.

L'essai d'expansion vapeur réalisé sur un échantillon de granulométrie 0/10 mm et confectionné à la table vibrante donne un gonflement de 1.8 ± 0.1 %.

Le matériau en 0/10 mm présente une masse volumique apparente plus élevée que le matériau de référence et sa valeur de gonflement est moins élevée que la référence. Toutefois, compte tenu des écarts-types, la diminution du gonflement n'est pas mathématiquement significative.

Pour la série de mesures des gonflements en immersion dans l'eau, les valeurs de gonflement obtenues sont toujours inférieures à la valeur de référence, malgré une période d'immersion environ trois fois plus longues. Il est également important de noter que nous ne disposons pas d'écart type pour les séries immergées.

L'échantillon 0/10 mm confectionné à la table vibrante a une valeur de gonflement en immersion légèrement inférieure à celui 0/22.4 mm recomposé selon la courbe de Füller.

Les deux corps d'épreuves moulées à l'énergie proctor modifiée (AFNOR, 1999) présentent une différence de gonflement significative (quasi facteur 2). Dans ces cas, la masse volumique apparente est plus élevée pour l'échantillon courbe de Füller que pour le 0/22.4 mm brut.

4.2 Influence des coupures granulométriques

Le matériau LAC n°2 utilisé pour cette partie de l'expérimentation se caractérise par des valeurs d'expansion obtenues à l'essai de référence comprises entre 8 et 9%. Ces valeurs élevées présentaient l'intérêt de pouvoir travailler sur des gammes de

valeurs facilitant l'observation d'une influence de la granulométrie sur les gonflements à des échéances de temps raccourcies. Sur l'échantillon de référence, le gonflement à 92 h était déjà de l'ordre de 2.4 % (supérieure à 10 fois la précision instrumentale). Afin d'optimiser le planning expérimental, nous avons retenu de réaliser les observations à 92 h pour la phase 2.

La Figure 5a présente les points expérimentaux obtenus dans un graphe où le gonflement (compris entre 1.3 et 3 %) est exprimé en fonction de la masse volumique apparente (comprise entre 1.83 et 2.16 t/m³). Comme pour la première phase, aucune corrélation directe n'est observée.

La Figure 5b fait apparaître, en plus, les caractéristiques de confection de chaque point expérimental. En ne considérant que les relations coupures granulométriques versus valeurs de gonflement, on observe une forte influence de la coupure 5/11 mm. En effet, en comparant les valeurs obtenues sur les fractions 0/22.4 et 0/10 mm (i.e. discontinuité 10/22.4 mm), il apparaît que l'expansion est plus importante dans le deuxième cas. Les autres points expérimentaux montrent que le retrait de la coupure 0/5 mm engendre une baisse de la valeur d'expansion. Celle-ci est encore plus importante en enlevant la coupure 5/11 mm (gonflement divisé par 2 par rapport au 0/10 mm).

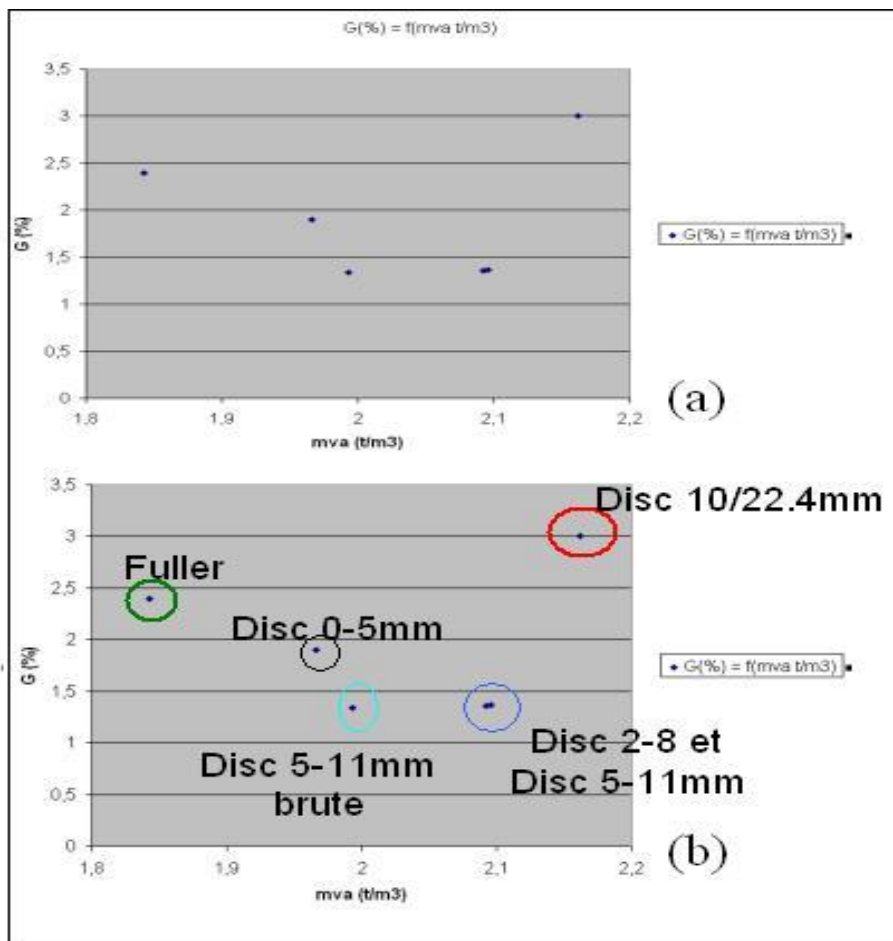


Figure 5: synthèse des résultats obtenus lors de la phase 2: (a) absence de corrélation entre G et MVA, (b) influence de la coupure 5-11mm.

5. Discussion

Le premier plan d'expérience montre que le phénomène d'hydratation par vapeur est plus efficace que l'immersion dans l'eau. La perméabilité à la vapeur des géomatériaux est plus élevée que la perméabilité à l'eau en phase liquide. De plus, la température d'essai plus élevée dans l'essai d'expansion vapeur (proche de 100°C pour 20°C en immersion) permet également de favoriser la cinétique d'hydratation.

L'analyse des résultats obtenus sur les séries immergées montre une relation compacité/gonflement différente selon les cas. L'augmentation de la compacité, pour un matériau de nature donnée, induit une compétition entre deux phénomènes : (i) la diminution de la perméabilité (défavorable à l'hydratation de la chaux vive et donc associée à des valeurs de gonflement en baisse) et (ii) une diminution de l'indice des vides et de la déformabilité (favorable à des valeurs de gonflement plus élevées).

Les résultats obtenus sur le LAC n°2 montrent que les coupures granulométriques n'ont pas toutes la même influence sur le potentiel de gonflement du matériau. Dans notre cas, les coupures inférieures à 10mm participent majoritairement au gonflement, avec une influence encore plus marquée pour la coupure 5/8 mm. Pour les coupures les plus grossières, les nodules de chaux sont très probablement emprisonnés à l'intérieur de la matrice, les rendant moins accessibles à l'hydratation (par la vapeur ou l'eau). Les coupures fines (<10 mm) sont donc plus sensibles à une réaction rapide compatible avec le délai de l'essai. Par ailleurs, la coupure 0/5 mm a une plus faible influence sur le résultat. Si la chaux présente dans cette fraction est rapidement accessible aux agents d'hydratation, leur évolution volumique influence faiblement le résultat de l'essai du fait de leur faible taille. La compacité des éprouvettes élaborées en laboratoire (<85%) permet alors de minimiser les gonflements.

6. Conclusion

Ces travaux menés sur la caractérisation en laboratoire de co-produits industriels ont permis de mieux cerner les variables influençant l'essai d'expansion vapeur utilisé dans les prescriptions de réemploi de produits.

Notamment, nous avons montré qu'il n'existe pas de relation simple entre l'état de compacité et la valeur du gonflement. De plus, sur le LAC n°2, nous montrons également que toutes les coupures granulométriques n'ont pas la même influence sur le résultat de l'essai.

Ces deux points permettent de discuter de la pertinence de réaliser l'essai sans considérer les références de compactage (optimum proctor normal et modifié) et sur un échantillon dont la courbe granulométrique est théorique.

L'utilisation de ces produits en traitement de sols dans le cadre de travaux de terrassement pourrait permettre de les valoriser grâce à ce qui représentait jusqu'à présent leur limité de réemploi. Des travaux complémentaires sont nécessaires pour cadrer cet emploi, notamment en distinguant les apports de l'amélioration « chimique » (hydratation de la chaux) et de l'amélioration géométrique (modification du squelette granulaire). De plus, les dosages doivent encore être définis pour avoir une amélioration efficace et optimale.

Remerciements

Ces travaux ont été financés en partie dans le cadre de l'opération de recherche AGREGA pilotée par Y. DESCANTES (IFSTTAR). L'auteur remercie Guy HENRYON (CEREMA Est) pour son aide dans la réalisation des essais en laboratoire.

7. Références bibliographiques

- AFNOR (1995). Sols : Reconnaissance et Essais – Détermination de la teneur en eau pondérale des matériaux – Méthode par étuvage. Norme NF P 94-050.
- AFNOR (1996). Sols : Reconnaissance et Essais – Analyse granulométrique – Méthode par tamisage à sec après lavage. Norme NF P 94 056.
- AFNOR (1997). Sols : Reconnaissance et Essais - Indice CBR après immersion - Indice CBR immédiat - Indice Portant Immédiat - Mesure sur échantillon compacté dans le moule CBR. Norme NF P 94-078.
- AFNOR (1998). Sols : Reconnaissance et Essais – Mesure de la quantité d'adsorption de bleu de méthylène d'un sol ou d'un matériau rocheux. Détermination de la valeur de bleu de méthylène d'un sol ou d'un matériau rocheux par l'essai à la tache. Norme NF P 94-068.
- AFNOR (1999). Sols : Reconnaissance et Essais – Détermination des références de compactage d'un matériau - Essai Proctor normal – Essai Proctor modifié. Norme NF P 94-093.
- AFNOR (2011). Essai pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats Partie 1 : Détermination de la résistance à l'usure. Norme NF EN 1097-1.
- AFNOR (2011). Essai pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats : Partie 2 : Méthodes pour la détermination de la résistance à la fragmentation. Norme NF EN 1097-2.
- AFNOR (2011). Granulats – éléments de définitions conformité et codification. Norme NF P 18545.
- AFNOR (2014). Essai pour déterminer les propriétés chimiques des granulats : Partie 1 : Analyse chimique. Norme NF EN 1744-1 +A1.
- AURIOL J. C., RAYSSAC E., PLATRET G., DENELEE D., DE LARRARD F., LEDEE V., (2006). Valorisation des laitiers d'aciérie LD pour les infrastructures routières. Séminaire de clôture de l'opération de recherche « Recyclage et matériaux non-conventionnels » LCPC – CTPL.
- BELHADJ E., DILIBERTO C. & LECOMTE A. (2011). Characterisation and activation of Basic Oxygen Furnace Slag. Cement and Concretes Composites, n°34, p. 34-40.
- DA SILVEIRA N. O., SLIVA M. V. A.M., AGRIZII E. J., DE LANA M. F., DE MENDOCA R. L. (2005). Slags-providing Solutions for Global Constructions and others Markets. 4th European slag conference, Oulu (Finlande) Proceedings, Euroslag Publication n°3.
- HOUZE C. (2013). Etude la valorisation des laitiers de l'industrie sidérurgique et de production des alliages silicomanganèse. Thèse de Doctorat, Université Paris-Est.
- RAYSSAC E., AURIOL J. C., DENELEE D., DE LARRARD F., LEDEE V. & PLATRET G. (2009). Valorisation de laitiers d'aciérie pour les infrastructures routières. Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées, n°275, pp 27-38.
- SETRA-LCPC (1992). Réalisation des remblais et des couches de forme. Fascicule 1 : principes généraux et Fascicule 2 : annexes technique (GTR). Guide technique.
- SETRA-LCPC (2000). Traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques – Application à la réalisation des remblais et des couches de forme (GTS). Guide technique.