

VALORISATION DE MELANGES DE CENDRES DE FOYER DE JORF LASFAR ET DE SCORIES DE L'ACIERIE SONASID DANS LES CHAUSSEES ROUTIERES

Souad El Moudni El Alami¹, Khaled Lahlou², Mohamed Monkade¹.

¹ Université Chouaib Doukkali, Faculté des Sciences, El Jadida, Maroc,

² Ecole Hassania des Travaux Publics, Casablanca, Maroc

E-mail: elmoudnisouad@yahoo.fr

Résumé

La zone industrielle de Jorf Lasfar, abrite la plus grande centrale thermique à charbon du Maroc (JLEC) qui se situe à proximité de la seule aciérie du pays (SONASID). Ces deux grandes unités génèrent des volumes importants de sous-produits sous forme de cendres et de scories.

Si de nos jours, plus de 600 milles tonnes de cendres volantes générées à Jorf Lasfar sont valorisés annuellement dans les ciments à travers la région du Centre-Ouest, les cendres de foyer de la JLEC et les scories de l'aciérie SONASID posent toujours des problèmes économiques et environnementaux au niveau de leur transport et de leur stockage en l'absence de voie de valorisation viable.

Dans ce travail, nous présentons une première tentative de valorisation de ces sous produits dans le domaine routier. Après une brève présentation des caractéristiques chimiques et géotechniques des cendres de foyer de JLEC et des scories de SONASID, nous montrons que des mélanges de ces deux résidus permettent d'obtenir des performances mécaniques intéressantes qui favorisent leur utilisation en couche de fondation de chaussée. Par ailleurs, ces mélanges ont subi des essais de lixiviation qui ont montré que leur taux de relargage des métaux lourds reste, en général, en deçà des limites admises par les prescriptions environnementales.

Mots clés: cendres de foyer, scories d'aciérie, valorisation, route, couche de fondation, lixiviation.

1- Introduction

En plus des centrales éoliennes et hydrauliques, le Maroc dispose de trois centrales thermiques : la centrale de Jérada, la centrale de Mohammedia et celle de Jorf Lasfar JLEC. L'activité de cette dernière est accompagnée par le rejet de résidus solides constitués essentiellement de cendres volantes et de cendres de foyer (CF). Les cendres volantes sont totalement valorisées dans le secteur cimentier. Par contre, les Cendres de Foyer (CF) sont encore destinées au stockage en terrils. A proximité de la JLEC se trouve l'aciérie Sonasid. Cette dernière produit de l'acier et engendre des milliers de tonnes de scories qui sont également mises en décharge. Vu l'absence de voies de valorisation viable, le stockage de ces sous produits représentent un surcoût économique et peut être à l'origine d'une menace environnementale en matière de largage des métaux lourds vers l'extérieur. Portant, ces sous-produits peuvent trouver des alternatives de recyclage attrayantes en génie civil si leurs utilisations sont écologiquement acceptables [1]. Sur le plan environnemental, ce type de valorisations doit toujours être suivi par des tests de lixiviation [2,3] pour s'assurer de la non nocivité des solutions de recyclage adoptées.

Dans le présent travail, les CF de JLEC ainsi que les scories de l'aciérie Sonasid ont fait l'objet d'une caractérisation complète. Des mélanges à base de ces deux sous produits ont, par la suite, été testés. L'approche expérimentale adoptée pour la détermination des différents pourcentages du mélange ainsi que l'optimisation des résultats, est la méthodologie des plans d'expériences. Après optimisation des performances géotechniques, des essais de lixiviation ont été entrepris afin de juger de la faisabilité environnementale de cette valorisation.

2-Matériaux utilisés

2-1- Provenance

Les CF utilisées au cours de cette étude sont produites dans la Centrale Thermique de Jorf Lasfar (JLEC) suite à la combustion d'un charbon issu de l'Afrique du Sud. Afin de diminuer leur teneur en eau, mais aussi pour stabiliser les processus de lixiviation, les CF de JLEC ont été déposées à l'air libre pendant trois semaines. Quant aux scories, elles sont récupérées après 3 mois de maturation à l'intérieur de l'aciérie Sonasid. Cette période est supposée suffisante pour atteindre leur stabilité dimensionnelle et éviter leur gonflement. Pour les besoins de cette étude, les CF de JLEC et les scories de Sonasid ont été écrêtées à 20 mm.

2-2- Caractéristiques chimiques

Les compositions chimiques des CF et des scories de SONASID ont été établies par la technique de fluorescence X. Les résultats de cette analyse sont reportés sur le tableau 1. On constate que les CF de JLEC sont riches en SiO_2 et Al_2O_3 . Elles contiennent aussi du Fe_2O_3 et leur teneur en CaO est très faible ce qui permet de les classer parmi les cendres silicoalumineuses (classe F) [3]. Les scories de SONASID contiennent également les éléments sus cités pour les CF mais se distinguent surtout par une grande teneur en CaO (44,7%). Cette dernière caractéristique laisse prévoir une accélération des réactions pouzzolaniques au niveau des mélanges CF- Scories.

Tableau 1: Composition chimique des cendres de foyer de JLEC et des scories de SONASID

Elément chimique	SiO_2	Fe_2O_3	Al_2O_3	CaO	MgO	Na_2O	K_2O	PbO	SO_3	CaO libre	PAF
CF (%)	50	9,7	24,3	2,14	1,09	0,41	2,2	0,01	1,87	0,29	6,48
Scories (%)	13,6	23,4	6,25	44,7	4,16	0	2,2	0,01	0,62	0,96	0,96

Les teneurs en métaux lourds ont été obtenues par la spectroscopie d'absorption atomique (ICP). Les résultats sont reportés sur le tableau 2. On voit bien que les CF et les scories contiennent des métaux lourds. Les scories sont plus concentrées en Cr, Cu, Pb et Zn.

Tableau 2 : Teneurs en métaux lourds des Cendres de Foyer de JLEC et des scories de SONASID

Eléments	As	Cd	Co	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
CF (ppm)	70	0,31	44	143	69	72	13,5	68
Scories (ppm)	84	0,31	8,14	4840	235	28	646	202

2-3- Composition minéralogique des CF de JLEC et des scories de l'aciérie Sonasid

Les spectres minéralogiques des CF (figure 1) et des Scories (figure 2) ont été établis par la diffraction à rayon X. Le diffractogramme de la figure 1 montre que les CF présentent deux pics, le premier correspondant au quartz et le deuxième à la mullite. Ce résultat concorde avec celui obtenu sur des CF étudiées au Brésil [3]. La figure 2 montre que les phases minéralogiques présentes dans les scories sont C_2S , C_2F , et FeO.

2-4- Caractérisation physique des CF et des Scories

La forme extérieure des CF est assimilable à celle du sable gris propre. Leur masse volumique absolue est faible et ne dépasse pas 1,76 kg/l. Les scories utilisées se caractérisent par une forme extérieure semblable aux granulats naturels et ont une masse volumique supérieure à 3,3 kg/l. La propriété de ces deux résidus est établie par l'essai au bleu de méthylène (VBS) qui fait l'objet de la norme NFP 18 -592 [4]. La valeur au bleu (VBS) enregistrée pour les CF est de 0,5. Quant au VBS des Scories, il ne dépasse pas 0,1. Ces deux valeurs renseignent sur une faible sensibilité à l'eau et encouragent l'utilisation de ces deux matériaux dans le domaine routier.

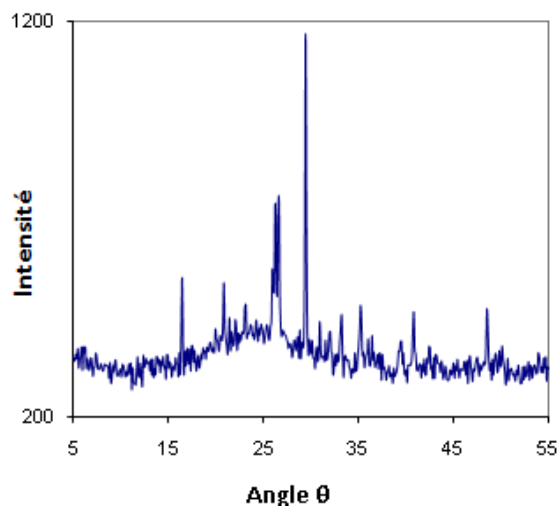


Figure 1: Composition minéralogique des Cendres de Foyer (CF) de JLEC

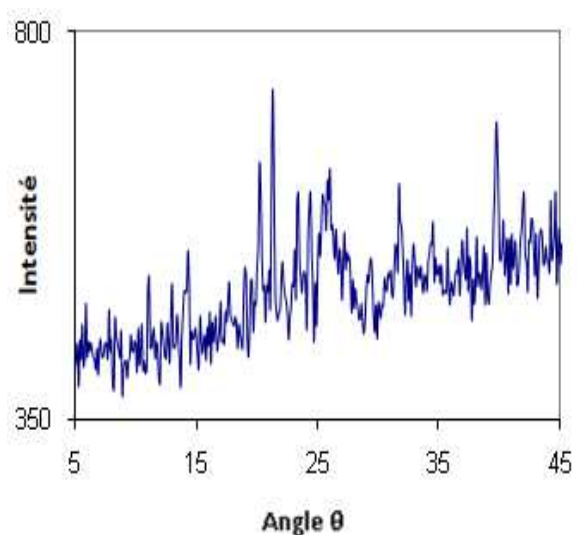


Figure 2: Composition minéralogique des Scories de l'aciérie Sonasid

3- Compactage du mélange CF- Scories.

Afin d'améliorer les caractéristiques des CF en terme de résistance et de dureté, celles-ci ont été mélangées avec les scories de l'aciérie SONASID possédant des caractéristiques chimiques, physiques et géotechniques encourageantes pour une éventuelle valorisation. Cette étude expérimentale a été menée par la démarche des plans d'expériences [6] qui permet d'une part de minimiser le nombre des essais et d'autre part d'optimiser les résultats obtenus. Les essais réalisés consistent à compacter, dans des moules Proctor modifié, différents mélanges de CF-scories amenés à différentes teneurs en eau. Une fois compactées, certaines éprouvettes sont soumises au poinçonnement pour la détermination de la portance CBR direct. Le reste des éprouvettes est soumis à l'imbibition pendant 7 jours pour mesurer la valeur du gonflement. Les éprouvettes imbibées ont été ensuite soumises au poinçonnement afin de déterminer leur CBR humide. Les éprouvettes destinées au contrôle de la résistance en compression R_c et aux tests de lixiviation ont particulièrement subi un murissement pendant trois mois dans un milieu humide à température de 20° C.

4- Présentation des résultats expérimentaux

Le plan d'expérience adopté pour l'étude des mélanges CF-Scories est un plan composite centré. Les facteurs considérés sont : les pourcentages d'eau et de Scories. Les quantités des CF et des scories vérifient l'équation suivante : $\sum (\% \text{ cendres de foyer} + \% \text{ Scories}) = 100\%$.

Les essais proposés par le modèle ainsi que les résultats moyens obtenus sont donnés sur le tableau 3. Chaque résultat représente la moyenne de 3 essais.

4-1- Analyse des résultats

Le tableau 2 montrent que l'influence des scories est significative sur la résistance à la compression, sur le gonflement et sur la portance du mélange. La résistance en compression du mélange CF-Scories augmente en fonction des pourcentages des scories ce qui est en toute vraisemblance dû à la présence de la chaux dans la composition des scories. Le CBR sec a pu atteindre des valeurs énormes qui dépassent ceux obtenus lors du traitement des CF à la chaux [7]. La même remarque est avancée pour le CBR humide qui a, contrairement aux granulats naturels, connu une nette amélioration. Par ailleurs, le gonflement a légèrement augmenté avec le pourcentage en scories. Toutefois les valeurs enregistrées sont très faibles par rapport à ceux exigés pour une éventuelle utilisation dans le domaine routier [8].

Tableau 3 : Résultats moyens des essais réalisés sur le mélange CF-Scories

Essai	Niveaux des facteurs			Réponses moyennes			
	CF (%)	Scories (%)	Eau (%)	Rc 90 Jours (MPa)	Gonflement (%)	CBR Sec (%)	CBR Humide (%)
1	70,3	29,71	11,85	0,62	0,054	93,32	121,45
2	47,72	52,3	11,85	1,13	0,2	93,3	175,7
3	70,3	29,71	16,15	0,76	0,11	99,27	173,33
4	47,72	52,3	16,15	1,27	0,016	109,6	234,3
5	74,91	25,1	14	0,48	0,2	127,49	112
6	43	57	14	1,6	0,02	113,2	296
7	59	41	10,97	0,61	0,2	93	128,6
8	59	41	17,03	1	0,23	83,4	160
9	59	41	14	1,1	0,002	104,8	253,7
10	59	41	14	0,97	0,02	99	231

Au sens de la méthodologie des plans d'expériences, chaque résultat est considéré comme réponse. La modélisation de ces réponses étudiées s'effectue par le logiciel DESIGN EXPERT 6. Pour chaque réponse on procède tout d'abord à la recherche du modèle qui convient, puis on passe à l'analyse de la variance et on termine par l'aboutissement à un modèle mathématique qui associe chaque réponse aux facteurs influents. L'ensemble des équations présentant les quatre réponses en fonction des paramètres significatifs est reporté sur le tableau 4. Les lettres E et S indiquent, respectivement les pourcentages de l'eau et des scories.

Tableau 4: équations de modélisation des quatre réponses

$R_{C90}^{0,42}$	$= -0,78 + 0,01 S + 0,17E - 5,54 10^{-3} E^2$
$CBR^{-1,53}$	$= 2,73 10^{-3} + 10^{-5} (4,68 S - 39,2 E - 3,4 10^{-2} S^2 + 1,55 E^2 - 0,13 SE)$
$G^{0,25}$	$= 3,74 + 0,01 S - 0,51 E + 4,84 10^{-4} S^2 + 0,02 E^2 - 4,17 10^{-3} S E$
$CBR_{Humide}^{-0,73}$	$= 0,18 - 1,67 10^{-3} S - 1,65 10^{-2} E + 1,21 10^{-5} S^2 + 5,15 10^{-4} E^2 + 2,71 10^{-5} ES$

Tenant compte des exigences de l'utilisation d'un matériau dans les chaussées routières et particulièrement en couche de forme et de fondation, les modèles obtenus nous permettent de proposer une formulation optimale qui consiste à minimiser le gonflement et à maximiser les valeurs de R_{C90} , du CBR et celle du CBR_{Humide} . Cette formulation a été établie pour des 52,3% en Scories et 16,2% d'eau.

5- Utilisation du mélange CF-Scories en couche de fondation d'une chaussée

Au vu de la raréfaction des matériaux routiers qui touche de plus en plus la région Doukkala-Abda, en plus des risques environnementaux liés à la mise en décharge des CF et des scories, l'opportunité de valorisation de ces sous-produits dans le corps des chaussées de la zone rurale autour de la ville d'El Jadida serait très profitable. Par référence au catalogue national des structures types de chaussées neuves [9], les deux structures de chaussée ci-dessous seraient équivalentes :

Figure 3: Variante de chaussée conventionnelle

RS bicouche
20 cm GNB
20 cm GNF2
10 cm AC

Figure 4: Variante de chaussée à base de CFS

RS bicouche
20 cm GNB
30 cm CFS
10 cm AC

avec AC : Couche anti-contaminante, GNF2 : Grave non traitée pour couche de fondation type 2, GNB : Grave non traitée pour couche de base, RS : Revêtement superficiel, CFS : mélange CF-Scories

Tenant compte des prix des matériaux utilisés dans les deux variantes, ainsi que ceux liés au transport, la comparaison entre les coûts des deux structures de chaussée, montre que l'utilisation des CFS comme substituants des GNF2, permet de diminuer le coût de mise en place de la chaussée de 77% pour des chantiers distants de 15 km de la zone industrielle de Jorf Lasfar. Pour des distances inférieures à 15 Km, la diminution du prix de la chaussée devient encore plus importante.

6- Evaluation environnementale de la valorisation du mélange CF-Scories (CFS) en couche de fondation.

La caractérisation des CF de JLEC et des Scories de SONASID montre que ces dernières contiennent des métaux lourds. Toutefois, il n'existe pas forcément une relation directe entre la teneur en métaux lourds et le potentiel de largage des sous produits. De ce fait, et pour évaluer le potentiel polluant des CF brutes puis des mélanges CFS, des tests de lixiviation ont été réalisés. Le protocole de cet essai fait l'objet de la norme hollandaise NEN 7345 [10]. Il est réalisé sur des éprouvettes compactées de CF et sur des éprouvettes de CFS à base du mélange optimal (52,3% en Scories et 16,2% d'eau). Les éprouvettes de CFS et de CF ont été immergées dans l'eau distillée (lixiviant). Le rapport volume de liquide/Volume de solide a été fixé à 5. Les solutions sont renouvelées après des échéances de 1 jour, 2, 4, 8, 16, 32 et 64 jours. Après filtration à 0,45µm, chacun de ces lixiviats est analysé par ICP. Les résultats présentant les concentrations des métaux lourds lixiviés par les CF et les CFS, sont reportées dans le tableau 5. La comparaison des résultats avec les limites exigées par la norme Hollandaise adaptée au contexte hydrologique Marocain MBMD (Modified Building Materials Decree) [11], montre qu'à l'exception du Cd, tous les métaux représentent des quantités inférieures à celles exigées par la norme en vigueur.

Tableau 5: Concentration, en mg/m², des métaux lourds lixiviés au bout de 64 jours par des éprouvettes de CF et de CFS avec comparaison aux limites suggérées par le MBMD [11]

Eléments	CF	CFS	Limites Sup MBMD
As	3,5	3,75	103
Cd	10,63	6,88	3
Co	3	3	71
Cr	1,75	8,25	355
Cu	3,5	53,25	128
Mo	5,13	12,38	35
Ni	21,5	1,75	124
Pb	4,5	5	301
Zn	63,13	3,63	496

7- Conclusions

Cette étude a été réalisée dans le but d'apprécier les caractéristiques techniques des cendres de foyer (CF) de JLEC et des scories de l'aciérie Sonasid afin de pouvoir juger de la possibilité de leur valorisation dans le domaine routier. Nos résultats permettent de faire les conclusions suivantes:

- 1- Les CF de JLEC et les scories de l'aciérie Sonasid sont dotées de caractéristiques physico-chimiques intéressantes. Leur forme granulaire et leur propreté facilite leur valorisation dans le domaine routier.
- 2- La résistance en compression R_{c90} des éprouvettes à base de mélanges CF-Scories augmente avec le pourcentage des scories. La valeur de la résistance a pu atteindre 1,6 MPa pour 57% de scories. Cette valeur laisse croire que la teneur en chaux des scories favorise les réactions pouzzolaniques avec les CF.
- 3- La densité et la portance à sec et humide sont grandement améliorées par le mélange des CF avec les Scories. De plus, ces améliorations sont accompagnées par la réduction du gonflement, favorisant ainsi l'utilisation du mélange dans le domaine routier.
- 4- La variante CFS en couche de fondation présente une alternative très économique par rapport à la variante conventionnelle utilisant des GNF2 et ce particulièrement dans les environs du Jorf Lasfar.
- 5- Les CF et les scories contiennent des métaux lourds, mais les tests de lixiviation réalisés sur des éprouvettes compactées à base de ces sous produits bruts et mélangés montre que la majorité des métaux largués restent largement en deçà des concentrations limites.

Cette étude nous a permis de mettre en valeur les caractéristiques géotechniques des CF de JLEC et des Scories de l'aciérie Sonasid, qui n'ont jamais été valorisées à l'échelle nationale. Leur mélange a permis d'aboutir à des performances suffisantes pour une valorisation viable en construction routière. En plus de son intérêt économique, cette valorisation constituera une bonne alternative à la mise en décharge et contribuera à la limitation des risques environnementaux auxquels la région Doukkala-Abda ne cesse d'être confrontée depuis la mise en place du grand pôle industriel de Jorf Lasfar.

Bibliographie

- [1]- American Coal Ash Association (AACA). 2007 et 2008 Applications, Science and Sustainability. Disponible à www.worldofcoalah.org
- [2] Medkore. Z , Valorisation des Scories d'Aciérie Electrique dans le domaine routier 2005. Ecole Hassania des Travaux Publics. Casablanca.Maroc.
- [3] Cheriaf, J and all, 1999. Pozzolanic. Properties of pulverized coal combustion bottom ash. Cement and Concrete Research, 1387–1391.
- [4] Dupin. R, Lanchon.R , Saint-Arromain J.C. 1995. Granulats, Sols, Ciments et Bétons. Caractérisation des Matériaux de Génie Civil par les Essais de Laboratoire. Casteilla. 235 pages.
- [5] Direction des Routes et de la Circulation Routière. 2002. Guide Marocain pour les Terrassements Routier, Fascicule 1. Ministère de l'Equipement. Rabat. 106 pages.
- [6] Linder R, 2005, Les plans d'expériences: Un outil indispensable à l'expérimentateur. Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées. Collection du Laboratoire Centrale des Ponts et Chaussées. Paris
- [7] Mhimra Y, El Yousoufi M. 2008. Valorisation des Cendres de Foyer de la Centrale Thermique de Jorf Lasfar (JLEC) dans le domaine routier. Ecole Hassania des Travaux Publics. Casablanca Maroc. 94 pages
- [8] Laboratoire Centrale des Ponts et Chaussées. 2000. Traitement Des Sols A La Chaux Et/Ou Aux Liants Hydrauliques. Application à la réalisation des remblais et des couches de forme, SETRA. 240 pages. Paris
- [9] Direction des Routes et de la Circulation Routière. 1995. Catalogue des Structures Types de Chaussées Neuves 85 pages. Royaume du Maroc. Ministère de l'Equipement. Rabat. Maroc.

- [10]- Van der Sloot, and all. 1994. Approach towards international standardisation: a concise scheme for testing of granular waste leachability. - Environmental Aspects of Construction with Waste Materials (eds. Goumans, J.J.J.M., van der Sloot, H.A., Aalbers, T.G.), Elsevier..
- [11]- Aachib M. 2002. Interprétation des résultats de l'étude environnementale de la valorisation des scories dans le ciment en tenant compte des conditions naturelles du Maroc. Rapport final EHTP CERSHE 02-01, Holcim Maroc, 39 p.