

Valorisation d'un mélange de cendres de foyer de centrale thermique et de scories d'aciérie en techniques routières

Souad El Moudni El Alami¹, Mohamed Monkade¹, Khaled Lahlou²

1. Université Chouaib Doukkali, Faculté des sciences, El Jadida, Maroc

2. Ecole Hassania des travaux publics, Casablanca, Maroc

Pour tout contact : elmoudnisouad@yahoo.fr

Résumé

La zone industrielle de Jorf Lasfar, à El Jadida, dispose de plusieurs unités industrielles qui génèrent des volumes importants de sous-produits. Parmi ces unités, la centrale thermique JLEC, qui génère plus de 640 000 tonnes par an de résidus solides constitués de deux types de cendres : cendres de foyer et cendres volantes. Ces dernières sont valorisées dans les ciments alors que les cendres de foyer restent stockées en décharge et n'ont jamais été réutilisées. A proximité de JLEC, l'aciérie Sonasid transforme de grandes quantités de ferrailles pour produire quelque 800 000 à 1 million de tonnes de billettes d'acier en générant des milliers de tonnes de scories par an. En plus des coûts de transport et de stockage, les cendres de foyer de JLEC et les scories de Sonasid présentent une menace environnementale potentielle en l'absence de voie de valorisation viable.

Dans ce travail, nous présentons une caractérisation chimique et géotechnique des cendres de foyer de JLEC et des scories de Sonasid. Nous montrons que le mélange de ces deux sous-produits permet d'aboutir à des performances mécaniques intéressantes qui rendent possible leur utilisation comme couche de fondation d'une chaussée routière. Ce type de valorisation représenterait une alternative intéressante par rapport à leur mise en décharge.

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

1. Introduction

Partout dans le monde, le problème des sous-produits industriels se pose avec acuité. Les cendres de centrales thermiques au charbon et les scories d'aciéries sont parmi les déchets solides produits en très grande quantité. Leur production est en croissance continue et leur gestion représente un défi majeur auquel les pays industrialisés et ceux en voie de développement sont toujours confrontés. En effet, certains de ces déchets contiennent des éléments très dangereux pour l'environnement et la santé humaine comme les métaux lourds. Dans le cas du stockage en terils, la lixiviation des métaux contenus dans ces déchets vers les sols et les eaux environnantes pose un sérieux risque environnemental.

Devant cette situation, plusieurs efforts ont été déployés pour la recherche de voies de valorisation de ces sous-produits, permettant d'une part l'économie des coûts de mise en décharge, et d'autre part la limitation de la dégradation des milieux environnants. Aujourd'hui, dans plusieurs pays [1, 2], les cendres de centrales au charbon sont largement utilisées dans l'industrie du ciment comme ajouts minéraux ou dans les chaussées comme substituant aux granulats naturels [1]. Quand aux scories d'aciéries, elles sont dotées de caractéristiques mécaniques permettant de les substituer aux granulats naturels dans les chaussées routières, en augmentant la résistance des couches et en diminuant leur épaisseur [2]. Certains pays européens utilisent les scories d'aciéries comme ballast pour les chemins de fer. Leur forme irrégulière et angulaire en fait une fondation stable et ferme et leur résistance à l'usure minimise la dégradation causée par la circulation intense [2].

Au Maroc et en particulier dans la zone industrielle de Jorf Lasfar, située à 15 km de la ville d'El Jadida, se trouvent la centrale thermique de Jorf Lasfar JLEC et l'aciérie de Sonasid. L'activité de ces deux unités industrielles engendre de grandes quantités de déchets solides. Pour produire de l'électricité couvrant plus de 60 % du besoin du royaume, la centrale thermique JLEC utilise le charbon comme combustible principal. Cette combustion engendre plus de 640 000 tonnes par an de résidus solides constitués des cendres volantes et des cendres de foyer (CF). Les cendres volantes sont aujourd'hui valorisées dans les ciments, alors que les CF continuent à être stockées dans de grandes carrières. L'aciérie de Sonasid, quant à elle, recycle des quantités énormes de ferrailles pour produire plus de 800 000 tonnes de billettes d'acier, engendrant environ 100 000 tonnes de scories par an [2]. En l'absence de site de stockage et de voie de valorisation à l'échelon national, les scories de cette aciérie représentent une menace environnementale potentielle. Toutefois, la caractérisation de ces scories montre qu'elles présentent des caractéristiques mécaniques excellentes en termes de résistance et de durabilité. Ces propriétés peuvent être exploitées dans certains domaines, notamment le secteur routier.

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 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.

2. Matériaux utilisés

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 Afrique de Sud. Afin de diminuer leur teneur en eau mais aussi pour stabiliser les processus de lixiviation, les CF de JLEC ont subi une période de maturation 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 pendant la valorisation dans la chaussée. Pour les besoins de cette étude, les CF de JLEC et les scories de Sonasid ont été criblées à 20 mm.

Les compositions chimiques des CF et des scories 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 et contiennent Fe_2O_3 . Leur teneur en CaO est très faible, ce qui permet de les classer parmi les cendres de classe F (silicoalumineuses) [3]. Les scories de l'aciérie Sonasid contiennent également les éléments 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

Élément 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 (%)	13,55	23,4	6,25	44,7	4,16	0	2,2	0,01	0,62	0,96	0,96

Les compositions minéralogiques des CF (figure 1) et des scories (figure 2) ont été établies 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 montre notamment un halo non prononcé mais caractéristique d'une texture vitreuse potentiellement réactive. Ces résultats concordent avec ceux obtenus 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 . Ces résultats sont en accord avec ceux obtenus sur des scories en Europe [2] qui sont largement valorisées dans le domaine routier [2, 3].

Figure 1 : Composition minéralogique des cendres de foyer (CF) de JLEC

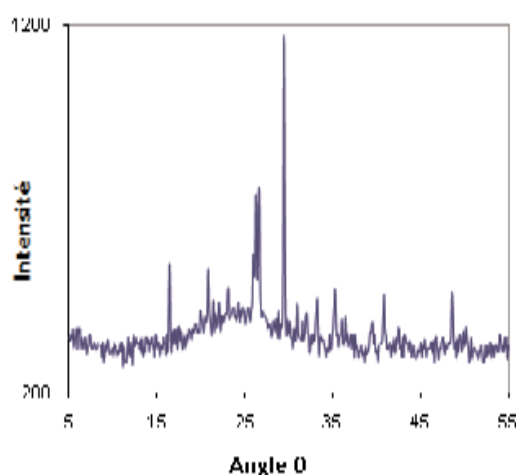
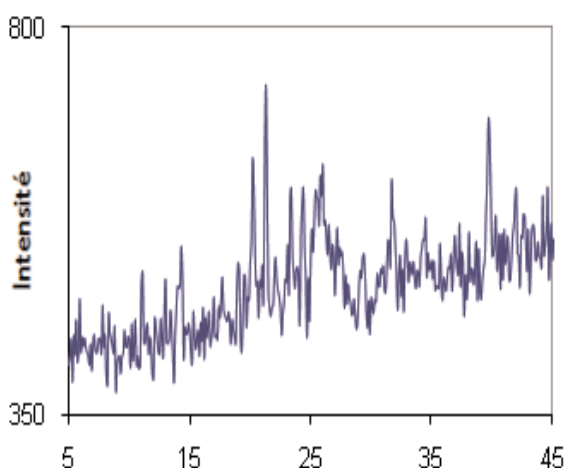


Figure 2 : Composition minéralogique des SCORIES de l'aciérie Sonasid



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 une masse volumique supérieure à 3,3 kg/l.

La propreté des CF et des scories est établie par l'essai au bleu de méthylène (VBS) qui fait l'objet de la norme NFP 18-592 [4]. Ce dernier a comme objectif la détermination du taux de la partie argileuse ainsi que son degré de sensibilité à l'eau. Le principe de l'essai consiste à fixer, sur les grains d'argile, des molécules de bleu de méthylène. La quantité fixée est par la suite évaluée par un simple test appelé test de la tâche. La valeur au bleu de méthylène (VBS) représente le rapport du volume (en ml) de solution de bleu utilisée sur la masse sèche de la prise d'essai (en g). Ainsi nous avons enregistré pour les CF un VBS de 0,5, quant au VBS des scories, il ne dépasse pas 0,1. Ces deux valeurs correspondent à une faible sensibilité à l'eau et sont favorables pour l'utilisation de ces deux matériaux dans le domaine routier.

Dans le but d'améliorer les caractéristiques des CF, celles-ci ont été mélangées avec les scories de l'aciérie Sonasid possédant des caractéristiques chimiques, physiques et géotechniques très encourageantes pour une éventuelle valorisation. Cette étude a été menée selon la démarche des plans d'expériences [6] qui permet à la fois la minimisation des nombres d'essais et l'optimisation des résultats. Les essais réalisés consistent à compacter, dans des moules Proctor modifiés (h = 15 cm, R = 7 cm), différents mélanges de CF-scories amenés à différentes teneurs en eau. L'essai est réalisé conformément à la norme NFP 94-078. Après compactage, certaines éprouvettes sont soumises au poinçonnement par une machine de presse afin d'évaluer leurs enfoncements. Ceci nous permet de calculer l'indice CBR direct (Californian Bearing Ratio). Le reste des éprouvettes est soumis à l'imbibition pendant 7 jours pour mesurer la valeur du gonflement (G). Ces dernières éprouvettes ont été ensuite soumises au poinçonnement afin de déterminer leur CBR humide. Les éprouvettes destinées au contrôle de la résistance en compression Rc ont particulièrement subi le mûrissement pendant 3 mois dans un milieu humide à température de 20 °C avant les tests d'écrasement.

3. Présentation des résultats expérimentaux

Le plan d'expérience adopté pour la réalisation 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 2. Chaque résultat représente la moyenne de trois essais.

Tableau 2 : 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	70,29	29,71	11,85	0,62	0,054	93,32	121,45
2	47,72	52,28	11,85	1,13	0,2	93,3	175,7
3	70,29	29,71	16,15	0,76	0,11	99,27	173,33
4	47,72	52,28	16,15	1,27	0,016	109,6	234,3
5	74,91	25,09	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

3.1. Analyse des résultats

Les résultats obtenus montrent que l'influence des scories est très 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 de 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 celles obtenues 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 celles exigées pour une éventuelle utilisation dans le domaine routier [8].

3.2. Optimisation des résultats

Au sens de la méthodologie des plans d'expériences, chaque résultat est considéré comme réponse. La modélisation de ces réponses étudiées s'effectue avec 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 3. Les lettres E et S indiquent, respectivement, les pourcentages de l'eau et des scories.

Tableau 3: Equations de modélisation des quatre réponses

$R_{c90}^{0,42}$	$= -0,78 + 0,01 S + 0,17E - 5,54 \cdot 10^{-3} E^2$
$CBR^{-1,53}$	$= 2,73 \cdot 10^{-3} + 10^{-5} (4,68 S - 39,2 E - 3,4 \cdot 10^{-2} S^2 + 1,55 E^2 - 0,13 SE)$
$G^{0,25}$	$= 3,74 + 0,01 S - 0,51 E + 4,84 \cdot 10^{-4} S^2 + 0,02 E^2 - 4,17 \cdot 10^{-3} SE$
$CBR_{Humide}^{-0,73}$	$= 0,18 - 1,67 \cdot 10^{-3} S - 1,65 \cdot 10^{-2} E + 1,21 \cdot 10^{-5} S^2 + 5,15 \cdot 10^{-4} E^2 + 2,71 \cdot 10^{-5} ES$

3.3. Formulation optimale

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 prend en considération les exigences suivantes :

- des valeurs de R_{c90} , CBR et CBR_{Humide} maximales
- une valeur de gonflement minimale.

Le tableau 4 représente la formulation optimale obtenue pour les différents paramètres.

Tableau 4 : Formulation optimale du mélange CF-scories

Dosage en scories (%)	52,3
Dosage en eau (%)	16,2
R_{c90} (MPa)	1,3
Indice CBR (%)	104
Gonflement (%)	0,01
Indice CBR après immersion (%)	253

4. Utilisation du mélange CF-scories en couche de fondation d'une chaussée

Au vu de la rarefaction 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

RS bicouche
20 cm GNB
30 cm CFS
10 cm AC

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 de ceux liés au transport, la comparaison entre les coûts des deux structures de chaussée montre que l'utilisation des CFS comme substituant 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 est encore plus importante.

5. Conclusions

L'objectif de cette étude expérimentale était de faire une caractérisation complète 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.

Les résultats établis permettent de conclure :

1. Les CF de JLEC et les scories de l'aciérie Sonasid sont dotées de caractéristiques très intéressantes en matière de composition physico-chimique et de propreté. Les scories de Sonasid sont particulièrement riches en chaux ce qui laisse prévoir des bonnes performances de résistance en compression.

2. La résistance en compression R_{c90} des éprouvettes à base de 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 peut être due à la teneur en chaux des scories qui favorise les réactions pouzzolaniques.

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, qui représente un point très positif pour l'utilisation du mélange dans le domaine routier.

4. La variante CFS dont la couche de fondation est réalisée à base du mélange CF-scories présente une alternative très économique par rapport à la variante conventionnelle contenant des GNF2. Pour des distances de 15 km de la zone industrielle de Jorf Lasfar, la variante à base CFS fait diminuer le coût de mise en œuvre de la chaussée de plus de 77 % du prix de la variante conventionnelle.

Cette étude nous a permis de mettre en relief 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'améliorer les performances des CF en matière de densité, de résistance et de portance. En plus de son intérêt économique, cette valorisation présente une alternative très efficace à la solution de mise en décharge, en termes de 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.worldofcoalash.org.

[2] Medkore Z., Valorisation des scories d'aciérie électrique dans le domaine routier. 2005. Ecole Hassania des travaux publics. Casablanca. Maroc.

[3] Cheriaf J., Cavalcante Rochaa J., Pérab J., Pozzolanic 1999. 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 routiers, Fascicule I. Royaume du Maroc. Ministère de l'Équipement. Rabat. 106 pages.

[6] Linder R., 2005, Les plans d'expériences : un outil indispensable à l'expérimentateur. Presses de l'École nationale des ponts et chaussées. Collection du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées. Paris.

[7] Mhimra Y., El Youssefi 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 Central des Ponts et Chaussées. 2000. Traitement des sols à 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'Équipement. Rabat. Maroc.