

Valorisation de sous-produits industriels marocains en technique routière

C. DIOURI AYAD¹, K. EL KHOUTAYRI¹, K. LAHLOU¹, K. EL OMARI², A. ALAOUI^{2,3}, B. SAFIR⁴, A. BENDRIHEM⁴

1 CEDoc, Ecole Hassania des Travaux Publics, Equipe ERIC, route d'El Jadida BP 81081, Oasis, Casablanca, Maroc, www.ehtp.ac.ma

2 OCP S.A., 2-4 rue Al Abtal, Hay Arraha, Casablanca, Maroc <https://www.ocpgroup.ma/fr>

3 Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Cité Descartes, Avenue Blaise Pascal, 77420 Champs sur Marne, Paris, France, <http://www.enpc.fr/>

4 Laboratoire Central de Casablanca, COLAS, 19 rue des Lantanas Ain Sebaâ, Casablanca, Maroc, <http://lccmaroc.com/>

RÉSUMÉ. Le Maroc produit annuellement une quantité importante de phosphogypse et de scories noires d'aciérie, dont le stockage pose des contraintes sur les plans technique, financier et environnemental. Toutefois, la valorisation de ces coproduits/sous-produits en Génie Civil et notamment en technique routière, est une solution prometteuse s'inscrivant dans un cadre d'économie circulaire. Afin d'évaluer cette option nous avons, tout d'abord, identifié et caractérisé le phosphogypse et les scories noires d'aciérie produits dans la zone industrielle de Jorf Lasfar. Ensuite, notre démarche expérimentale a porté sur la recherche d'un mélange optimal entre ces deux coproduits/sous-produits traités au ciment et répondant aux exigences mécaniques d'une chaussée routière. Un dimensionnement comparatif par le logiciel ALIZE a permis de relever un gain non négligeable par rapport à une structure de chaussée équivalente constituée de graves conventionnelles.

MOTS-CLÉS : Phosphogypse, scories d'aciérie, économie circulaire, matériau routier, mélange optimal.

ABSTRACT. Morocco produces annually an important quantity of phosphogypsum, and steel slag, of which the storage poses technical, financial and environmental constraints. However, valorizing these coproducts/by-products in Civil Engineering works and specially for road engineering is a promising solution in a circular economy approach. In order to evaluate this option, we first identified and characterized the phosphogypsum and black slag produced in the industrial area of Jorf Lasfar. Then, our experimental approach focused on the search for an optimal mixture between these two by-products treated with cement, that meets the mechanical requirements of a road pavement. A comparative design using ALIZE software showed a significant cost gain compared to an equivalent road structure made up of conventional gravel.

KEY WORDS: Phosphogypsum, steel slags, circular economy, road material, optimum mixture.

I. INTRODUCTION

Au Maroc, la production d'acide phosphorique à partir des phosphates génère, au niveau des complexes industriels de Safi et de Jorf Lasfar, une quantité importante d'un coproduit, le phosphogypse, pour lequel plusieurs voies de valorisation sont actuellement en cours d'exploration/validation. Parallèlement, l'affinage de l'acier en four électrique produit quelques milliers de tonnes des scories d'aciérie par an, dont les stocks s'accumulent faute de voies de valorisation. La construction routière, qui consomme de grandes quantités de matériaux, apparaît dès lors parmi les voies de valorisation pratiques et intéressantes pour ces coproduits/sous-produits. En effet, le recyclage de ce type de matériaux pourra apporter des solutions intéressantes aux difficultés grandissantes de disponibilité en matériaux nobles tout en s'intégrant

dans une démarche d'économie circulaire. Cet objectif ne peut, toutefois, être atteint qu'au prix d'une démarche scientifique rigoureuse.

C'est dans cet esprit que, dès 2013, le groupe OCP a lancé un partenariat scientifique avec des établissements académiques - l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées (ENPC) et l'Ecole Hassania des Travaux Publics (EHTP) -, le Centre National d'Etudes et de Recherches Routières (CNER) - Ministère de l'Equipement, du Transport de la Logistique et de l'Eau, une entreprise de construction routière, GTR, filiale du Groupe COLAS, pour la mise en pratique de ce concept au niveau du site de Safi puis en 2019 à Jorf Lasfar.

L'objectif est de valoriser le phosphogypse qui est un sable fin, en couche d'assise de chaussées routières, par le biais d'un traitement optimal au ciment, en le mélangeant à un résidu d'aciérie pour avoir le squelette granulaire adéquat, dans une approche de développement durable basée sur l'économie circulaire et la préservation des ressources existantes. Le but étant d'atteindre les caractéristiques mécaniques requises pour répondre aux exigences techniques, environnementales et économiques d'une route.

Un pilote expérimental de 1 km a déjà été réalisé à Safi à base de phosphogypse traité au ciment et a donné des résultats très encourageants [1]. Les résultats expérimentaux de ce nouveau programme vont nous permettre de réaliser un deuxième pilote sur le réseau national pour valider in-situ, dans la région de Jorf Lasfar, les résultats obtenus en laboratoire.

Après une caractérisation détaillée de chaque coproduit/sous-produit utilisé, nous avons conduit un plan expérimental de mélange où nous avons fait varier les proportions des différents composants dans un domaine défini de façon à minimiser le dosage en ciment et à maximiser l'utilisation du phosphogypse, le complément du mélange étant réalisé avec des scories noires d'aciérie.

Les modèles empiriques de variation des caractéristiques recherchées en fonction des proportions des constituants ont été établis. Des mélanges optimaux ont, ensuite, été déterminés pour une utilisation en couche de forme, et mieux même, en couche de fondation.

Un dimensionnement comparatif sous ALIZE nous a permis de relever une économie de l'ordre de 20% par rapport à une structure conventionnelle conçue à base de grave non traitée dont les stocks sont parfois difficiles à trouver dans certaines régions.

II. ETUDE EXPERIMENTALE

A. Démarche et méthode expérimentales :

Il s'agit d'un programme expérimental pour déterminer des mélanges valorisant le phosphogypse et les scories noires d'aciérie, les plus optimaux possibles sur le plan mécanique. L'évaluation environnemental et économique sera menée ensuite pour les mélanges optimaux obtenus.

Afin d'évaluer l'effet de la variation des proportions des constituants sur les réponses recherchées, nous avons adopté l'approche des plans d'expériences [2].

Il s'agit d'un mélange de trois composantes dont la somme des proportions est égale à 100%, donc le plan de mélange sous contraintes de 1^{er} ordre s'avère le mieux adapté pour notre étude [2].

Les réponses ciblées par cette recherche sont [3] :

- CBR-4j : Indice de poinçonnement après 4j d'immersion ;
- IPI : Indice portant immédiat ;
- Gv : Gonflement vertical après 4j d'immersion avec surcharge (%) ;
- Rc-7j : Résistance à la compression simple à 7 jours (MPa) ;
- Rc-28j : Résistance à la compression simple à 28 jours (MPa) ;
- Rtb-28j : Résistance à la traction diamétrale à 28j (MPa) ;
- E-28j : Module de rigidité à 28j (MPa).

Les facteurs considérés dans le cadre de cette recherche sont les composantes sèches principales nécessaires à la formulation des mélanges, à savoir, phosphogypse, scories noires d'aciérie et ciment, et plus précisément leurs pourcentages dans les mélanges, réalisés à la teneur en eau optimale déterminée au Proctor Modifié.

Le choix des fourchettes d'étude des différents paramètres a été déterminé de façon à maximiser l'utilisation du phosphogypse et minimiser l'utilisation du ciment :

- PG (phosphogypse) : 45%-70%
- LA (Laitiers d'Acérie) : 23%-48%
- C (Ciment) : 4%-7%

La conception des mélanges et l'analyse des résultats statistiques ont été conduites par un logiciel spécialisé en plans factoriels (Design Expert). Le choix optimal des points expérimentaux a été dicté par la nécessité d'aboutir à des modèles quadratiques voire cubique pour le plan de mélange.

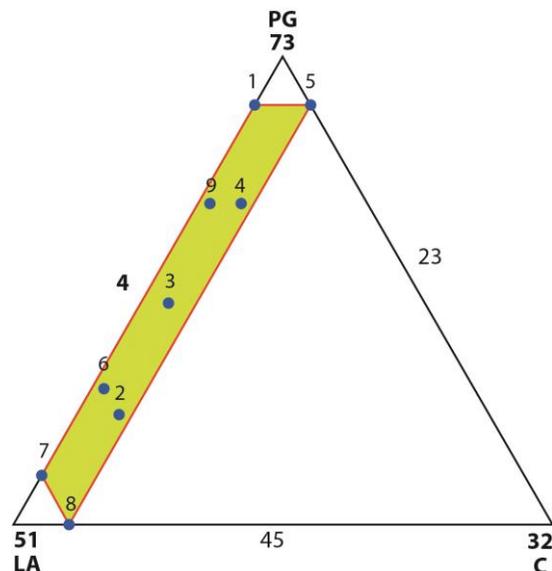


FIGURE 1. Représentation graphique des points expérimentaux retenus.

La démarche de traitement consiste à faire une correction granulatoire du phosphogypse par l'introduction des scories noires d'aciérie, et une amélioration des performances mécaniques en utilisant le ciment CPJ 35 [4].

Afin d'évaluer la validité des mélanges considérés, nous avons déterminé pour chaque mélange le couple $(\omega_{OPM}, \rho_{OPM})$ par l'essai du Proctor Modifié selon la norme NF P94-093, ces paramètres nous ont permis de confectionner les éprouvettes destinées aux essais :

- De compression simple (pour déterminer la R_c à 7j, 28j et 90j) selon la norme NF P 98-232-1.
- De compression diamétrale (pour déterminer le couple (R_t, E) à 28j et 90j) selon la norme NF P 98-232-3.
- Ensuite, la traficabilité est évaluée par le CBR-4j et l'IPI sur éprouvettes compactées à l'énergie Proctor modifiée, et à la teneur en eau optimale, et finalement le gonflement est mesuré dans les éprouvettes mises en immersion à 4j selon la norme NF P 94-078.

B. Matériaux utilisés :

En premier lieu, les matériaux ont été caractérisés avant de procéder aux essais. Le séchage du phosphogypse se fait à 60°C dans une étuve pour conserver ses propriétés minéralogiques à partir d'une teneur initiale de l'ordre 30%. L'analyse granulométrique par laser (Figure 2) montre qu'il s'agit bien d'un sable fin, par le fait que :

- Diamètre maximal : $D_{max} = 1 \text{ mm}$.
- Diamètre moyen des grains : $D_{50\%} < 0,063 \text{ mm}$.

Il s'agit d'un coproduit industriel, donc selon le guide de terrassements routier [5], c'est un matériau de classe F5.

Quant aux scories noires d'aciérie, leur teneur en eau est quasi-nulle, et leur analyse granulométrique présentée à la figure 2 donne :

- Diamètre moyen des grains $D_{50} = 12,5\text{mm}$.
- Pourcentage des fines = 0,3%.

Le fuseau des 9 mélanges (Figure 2) montre que nous arrivons à avoir un matériau de granulométrie corrigée.

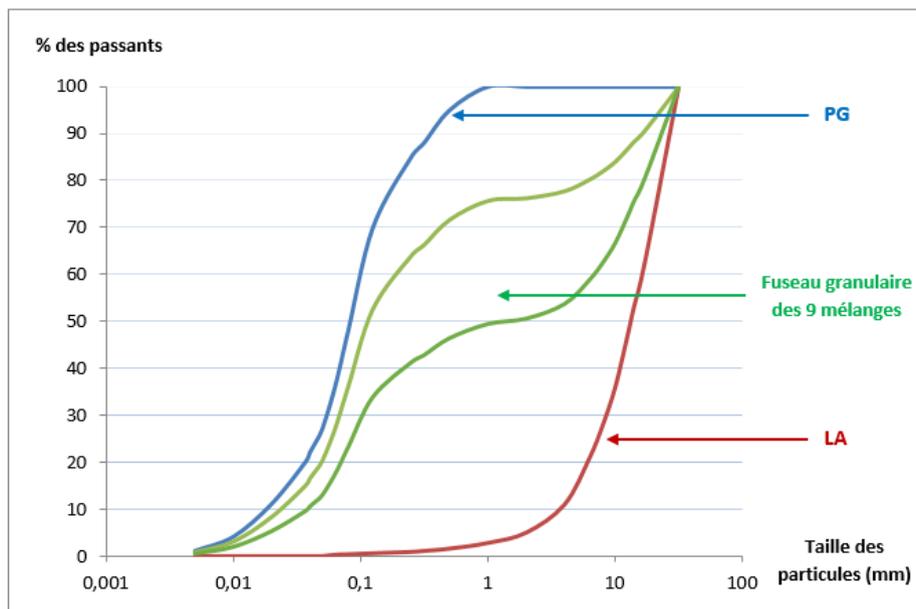


FIGURE 2. Courbe granulométrique du phosphogypse de Jorf Lasfar, des laitiers d'aciérie de la SONASID Jorf Lasfar et du fuseau granulométrique des 9 mélanges étudiés.

III. RESULTATS OBTENUS ET ANALYSE

Les résultats des points expérimentaux sont présentés au tableau 1. Les valeurs de résistance R_{c-7j} , R_{c-28j} , R_{t-28j} et de module $E-28j$ représentent une moyenne obtenue sur 2 répétitions avec 3 éprouvettes par essai.

D'après les résultats obtenus (tableau 1), on remarque que :

- L'ajout du ciment et des laitiers d'aciérie améliore considérablement la portance immédiate et après 4 j d'immersion du phosphogypse ;
- Pour des mélanges ayant le même dosage en ciment (exemple : 70% PG, 23% LA, 7% C et 45% PG, 48% LA, 7% C), l'IPI passe de 102 à 140 et le CBR-4j de 159 à 278, ce qui montre l'influence du dosage des laitiers d'aciérie sur la portance ;

- La portance est nettement améliorée après 4 jours d’immersion, les rapports CBR-4j/IPI sont tous nettement supérieurs à 1, ce qui est un critère de pérennité des traitements envisagés [1,2] ;
- Le gonflement vertical varie entre 0,094% et 0,84%, qui représentent des valeurs admissibles pour l’utilisation en couche de forme et en assises de chaussées. En effet, les guides [1,2] tolèrent un gonflement maximal de 5% ;
- A l’âge de 7j les résistances à la compression simple de tous les mélanges ne dépassent pas 0,4 MPa, donc le délai de mise en circulation dépasse 7j. En effet, selon [1,2], à l’âge de mise en circulation la résistance à la compression simple doit dépasser 1 MPa ;
- Une couche avec 70% PG, 26% LA, 4% C n’est pas circulaire même à l’âge de 28 j.

Pour modéliser mathématiquement chaque réponse recherchée en fonction des dosages des différents matériaux, une analyse de variance a été conduite par un logiciel spécialisé de plans de mélange. Le choix du type de modèles à adopter est conditionné par un test de signification de Fisher [2] supérieur à 95%.

TABLEAU 1 : Résultats des essais sur les 9 points expérimentaux.
(Les valeurs entre parenthèses représentent le coefficient de variance)

	IPI (wOPM)	CBR-4j (wOPM)	Gv (%)	Rc-7j (MPa)	Rc-28j (MPa)	Rtb-28j (MPa)	E-28j (MPa)
70%PG, 26%LA, 4%C	80	100	0,71	0,18 (7%)	0,9 (13%)	0,03 (33%)	1260 (6%)
51,625%PG, 42,125%LA, 6,25%C	138	162	0,36	0,27 (5%)	1,38 (5%)	0,19 (19%)	1050 (4%)
58,25%PG, 36,25%LA, 5,5%C	121	132	0,22	0,24 (7%)	1,26 (5%)	0,17 (13%)	1045 (9%)
64,125%PG, 29,625%LA, 6,25%C	111	125	0,6	0,27 (12%)	1,33 (7%)	0,13 (8%)	920 (10%)
70%PG, 23%LA, 7%C	102	159	0,84	0,21 (21%)	1,22 (6%)	0,084 (13%)	785 (23%)
53,125%PG, 42,125%LA, 4,75%C	119	145	0,15	0,22 (17%)	1,2 (9%)	0,13 (19%)	810 (14%)
48%PG, 48%LA, 4%C	128	130	0,094	0,21 (9%)	1,09 (13%)	0,1 (15%)	1360 (11%)
45%PG, 48%LA, 7%C	140	278	0,62	0,35 (7%)	1,58 (7%)	0,15 (12%)	1300 (11%)
64,125%PG, 31,125%LA, 4,75%C	98	135	0,36	0,2 (9%)	1,13 (21%)	0,12 (10%)	910 (4%)

Le tableau 2 regroupe ces modèles mathématiques avec comme indice de qualité de modélisation le R² ajusté [2].

TABLEAU 2 : Modèles mathématiques des réponses recherchées en fonction des dosages des matériaux

Equation (les dosages en % et les réponses à l'unité des normes respectées)		R ² ajusté du modèle utilisé
$CBR-4j = -9,8.PG + 107.LA - 28788.C - 5,4.PG.LA + 320.PG.C + 321.LA.C$	(1)	98% (quadratique)
$IPI = 1,14.PG - 14.LA + 4324.C + 0,08.PG.LA - 48.PG.C - 48.LA.C$	(2)	97% (quadratique)
$Gv = 0,056.PG + 0,0039.LA + 11,9.C - 0,013.PG.C - 0,12.LA.C$	(3)	97% (spécial cubique)
$Rc7j = 0,015.PG - 0,051.LA + 20,8.C + 0,0032.PG.LA - 0,23.PG.C - 0,23.LA.C + 0,00013.PG.LA.C$	(4)	96% (spécial cubique)
$Rc28j = 0,005.PG + 0,000016.LA + 0,059.C + 0,0029.LA.C$	(5)	88% (quadratique)
$Rtb28j = -0,0082.PG - 0,015.LA + 0,036.C + 0,00048.PG.LA$	(6)	93% (quadratique)
$E28j = 150.PG - 598.LA + 193016.C + 33.PG.LA - 2152.PG.C - 2146.LA.C$	(7)	92% (spécial cubique)

A. Mélange optimal pour utilisation en couche de forme :

Les critères retenus pour l'optimisation du mélange à utiliser en couche de forme sont définis comme suit : [5]

- $CBR > 20$ et $CBR/IPI > 1$;
- $Rc-28j > 1\text{MPa}$;
- $Rt-360j > 0,1\text{MPa}$;
- Calcul de la valeur de $E-360j$ à partir de $E-28j$ par extrapolation, puis report du couple ($Rt-360j$, $E-360j$) dans l'abaque de classification [5] ;
- Maximisation du dosage en PG (objectif économique) ;
- Minimisation du dosage en ciment.

Le mélange optimal obtenu est situé dans la zone 5 sur l'abaque de classification des matériaux traités pour couche de forme [6].

B. Mélange optimal pour utilisation en couche d'assise :

Les critères retenus pour l'optimisation sont similaires à ceux considérés pour la couche de forme, sauf :

- $Rc-7j > 1,2\text{MPa}$ pour tenir compte d'un trafic de chantier moyen ;
- $Rt-360j > 0,18\text{MPa}$;
- Calcul de la valeur de $E-360j$ à partir de $E-28j$ par extrapolation, puis report du couple ($Rt-360j$, $E-360j$) dans l'abaque de classification [3], pour voir si le matériau est utilisable en couche d'assise.

Le mélange optimal obtenu ici conduit à une catégorie T1 dans l'abaque de classification des matériaux traités pour couche d'assises [3].

CONCLUSIONS

Compte tenu des résultats obtenus par la présente étude, la possibilité d'utilisation d'un mélange optimal de deux coproduits/sous-produits, phosphogypse + scories noires d'aciérie, traités au ciment a été confirmée en couche de forme et même en corps de chaussée (en couche de fondation) avec un gain non négligeable de coût de l'ordre de 20%.

Ainsi, nous avons pu optimiser le dosage en ciment à 5 % en couche de forme et 6% en couche d'assise. Si les résultats de résistance à la compression simple à jeune âge (7j) restent encore assez faibles, ceux à long terme vérifient bien les critères du guide GTS 2000 et CFTR 2007.

Une confirmation des extrapolations des résultats obtenus à 90j et à 360j sont en cours de vérification, ainsi qu'une analyse environnementale basée sur le potentiel polluant, dont les premiers résultats montrent que ces mélanges respectent la norme marocaine.

REMERCIEMENTS

Ce travail a été financé par le groupe OCP dans le cadre de projets pilotes pour la valorisation des phosphogypses en construction routière. Il a également bénéficié de la collaboration de la Sonasid qui a fourni les scories noires d'aciéries et leurs caractéristiques ainsi que de l'appui technique de la Direction des Routes, en particulier le Centre National d'Etudes Routières que nous remercions chaleureusement.

REFERENCES

[1] K. El Omari, A. Alaoui, K. Lahlou, B. Safir & M. Afechkar. (6 mars 2019). « Développement des infrastructures au Maroc : les coproduits industriels peuvent apporter des solutions alternatives durable », *le 1^{er} Workshop International sur la Valorisation des Déchets, Economie Circulaire et Développement Territorial, Ecole des Mines de Rabat*.

[2] J. Goupy (2017). Introduction aux plans d'expériences, 5^{ème} édition, Collection : Techniques et ingénierie. Dunod.

[3] Laboratoire central des ponts et chaussées LCPC, (France). Service d'études sur les transports, les routes et leurs aménagements SETRA. (2007). Traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques : application à la réalisation des assises de chaussées.

[4] Commission de normalisation des liants hydrauliques. (2019). Liants hydrauliques : ciments et les constituants des ciments. Norme Marocaine NM 10.1.004. Editée et diffusée par IMANOR.

[5] Laboratoire central des ponts et chaussées LCPC, (France). Service d'études sur les transports, les routes et leurs aménagements SETRA. (1998). Guide d'application des normes pour le réseau routier national, Conception et dimensionnement des structures de chaussée.

[6] Laboratoire central des ponts et chaussées LCPC, (France). Service d'études sur les transports, les routes et leurs aménagements SETRA. (2000). Traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques : application à la réalisation des remblais et des couches de forme.