



**HAL**  
open science

## **La recherche d'un procédé viable de valorisation d'un phosphogypse provenant de l'industrie phosphatière marocaine**

A. Moutaouakil, J.L. Pineau, K. Lahlou

### **► To cite this version:**

A. Moutaouakil, J.L. Pineau, K. Lahlou. La recherche d'un procédé viable de valorisation d'un phosphogypse provenant de l'industrie phosphatière marocaine. *Environnement, Ingénierie & Développement*, 2003, N°29 - 1er Trimestre 2003, pp.31-35. <10.4267/dechets-sciences-techniques.2231>. <hal-03178230>

**HAL Id: hal-03178230**

**<https://hal.science/hal-03178230v1>**

Submitted on 23 Mar 2021

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons CC BY 4.0 - Attribution - International License

# LA RECHERCHE D'UN PROCÉDÉ VIABLE DE VALORISATION D'UN PHOSPHOGYPSE PROVENANT DE L'INDUSTRIE PHOSPHATIERE MAROCAINE

Moutaouakil A.\*,\*\*, Pineau J.L.\*, Lahlou K.\*\*\*

\* LEM – ENS Géologie, Nancy \*\* Faculté des sciences, Rabat, Maroc \*\*\* Ecole Hassania des travaux publics, Casablanca, Maroc

7 Mt/an de phosphogypse sont rejetés en mer par l'unité de production d'acide phosphorique de Jorf Lasfar (Maroc). L'objet de la recherche est de proposer une solution de valorisation de ce produit qui tient compte des contraintes économiques, techniques et environnementales. La solution retenue est l'utilisation du phosphogypse dans la confection de la couche de forme d'une chaussée routière. Elle est issue d'une analyse bibliographique sur la valorisation du phosphogypse dans la production de matière (plâtre, ciment), dans les domaines géotechniques et agricoles d'une part et d'essais effectués au laboratoire suivant les travaux de Puiatti d'autre part. La résistance mécanique du phosphogypse a été améliorée par un ajout de 20 % en poids d'un limon à base d'ankérite, matériau naturel à faible coût. Elle passe de 0,25 MPa à 0,85 MPa, valeurs obtenues par Puiatti avec un mélange de phosphogypse et de 7 % en poids de ciment. La résistance du mélange lui permet d'être un bon matériau pour la confection de la couche de forme.

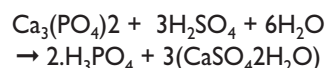
About seven million tons of phosphogypsum per year are dumped into sea generated from a phosphoric acid plant in Jorf Lasfar, Morocco. The objective of the present study is to find a solution in order to reuse this material by considering both techno-economic and environmental constraints. These materials are usually used as a filling material in road constructions. A literature survey is presented on the use phosphogypsum for production of construction materials (plasters, cements), in the domain of geotechniques and agriculture. This paper also presents the laboratory scale work according to Puiatti. It was observed that the mechanical strength of phosphogypsum was improved by addition of 20 weight % mud of ankerite base, which is a natural material and have a negligible cost. This mixture has a mechanical resistance passed 0.25 to 0.85 MPa, the same mechanical strength was obtained by addition of 7weight % cement reported by Puiatti. The mechanical resistance of this mixture permits it to be a good construction material.

Le procédé retenu par un industriel pour éliminer dans les meilleures conditions le déchet produit par son unité de production est un optimum, pour une période donnée, entre des critères économiques et des considérations politiques. Les critères économiques regroupent un ensemble de paramètres que sont la quantité et la qualité du déchet à éliminer, le prix de revient de la matière provenant de la valorisation matière du déchet et la disponibilité du marché à accepter cette matière. Les considérations politiques sont de trois ordres. Le premier est lié à la réglementation en vigueur dans le pays, le deuxième est lié à la volonté de l'industriel qui doit tenir compte de la notion de développement durable et le troisième lié aux prises de conscience nationale et internationale. Nous appliquons ce principe au phosphogypse, rejet de l'industrie phosphatière marocaine. Nous présentons successivement le phosphogypse, une synthèse bibliographique sur sa valorisation et les résultats expérimentaux obtenus sur un échantillon au laboratoire. Cette étude de laboratoire sert à orienter l'étude semi-industrielle en relation avec les contraintes physiques et économiques que nous avons retenues pour ce produit.

## LE PHOSPHOGYPSE, REJET DE L'INDUSTRIE PHOSPHATIERE ET L'ÉCHANTILLON ÉTUDIÉ

### le phosphogypse

Le sulfate de calcium hydraté ou dihydrate appelé phosphogypse est le résidu de l'attaque des concentrés miniers de phosphate par de l'acide sulfurique en vue de produire de l'acide phosphorique. Avec un phosphate tricalcique pur, la réaction est la suivante :



La production d'une tonne d'acide phosphorique à partir du phosphate pur génère en principe 3,6 tonnes de phosphogypse. Comme le concentré de phosphate n'est pas pur, il reste du quartz, des oxydes ferriques, des argiles et parce que le procédé n'est pas parfait, 5 tonnes de phosphogypse sont produites à la place des 3,6 tonnes. L'unité de Jorf

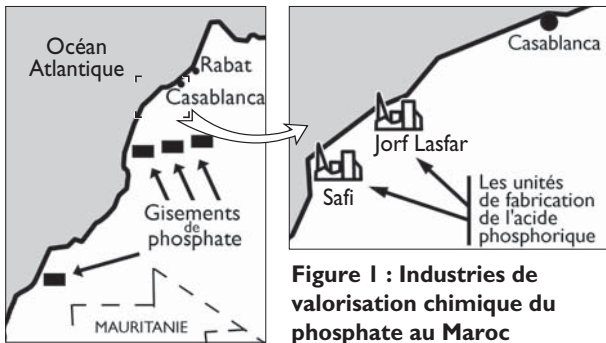


Figure 1 : Industries de valorisation chimique du phosphate au Maroc

Lasfar (figure 1) qui produit 1,4 millions de tonnes d'acide phosphorique par an, rejette 7 millions de tonnes de phosphogypse [19].

Trois solutions sont généralement proposées pour éliminer le phosphogypse, l'évacuation dans la mer ou dans les cours d'eau, l'entreposage, la valorisation du dihydrate. Les deux premières solutions sont les plus utilisées au niveau international. Dans le cas du Maroc, c'est la première qui est retenue actuellement. Mais à échéance, elle devra être abandonnée suite à l'application des conventions relatives à la protection de la mer telles que les conventions de Mexico (1972), Barcelone (1976) et Montréal (1995). Aussi dans la continuité de cette réflexion, nous avons étudié un échantillon de phosphogypse produit par l'unité de Jorf-Lasfar pour trouver quelle solution de valorisation devrait être privilégiée parmi celles proposées dans la littérature.

### Description de l'échantillon de phosphogypse ayant servi à l'étude

L'échantillon de phosphogypse prélevé à la sortie de l'unité de production de Jorf Lasfar d'une masse de 100 kg a une humidité de 30 %. Le pH de l'eau associée est de 2. Le phosphogypse se compose à 95 % en poids sec de dihydrate mis en évidence par une analyse diffractométrique. Des minéraux de quartz, de phosphate bicalcique, de sulfates de fer, de magnésium, d'aluminium constituent la fraction solide minoritaire. Le phosphogypse se présente sous forme de cristaux tabulaires à parallélépipédiques allongés (figure 2).

La forme des cristaux a été étudiée par Slack pour lequel les cristaux de gypse passent de l'état lamellaire à aciculaire trapu et parallélépipédique avec des concentrations croissantes en ion  $SO_4^{2-}$  et Adane pour lequel les cristaux de gypse en solution concentrée en acide phosphorique passent de l'état aciculaire à tabulaire avec des concentrations croissantes d'impuretés tels l'alumine et les oxydes de fer [1].

Une analyse granulométrique par tamisage modéré donne

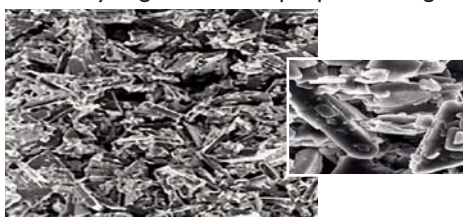


Figure 2 : Clichés MEB du phosphogypse

un  $D_{80}$  de 100  $\mu m$ . Une analyse au granulomètre laser donne un  $D_{80}$  de 50  $\mu m$  (figure 3). La différence entre les deux analyses granulométriques s'explique par l'organisation en agrégats des cristaux de phosphogypse. Le tamisage modéré respecte les agrégats alors que la granulométrie laser qui utilise des ultrasons les détruit pour ne conserver que les cristaux initiaux.

Dans le tableau I figure la composition en éléments majeurs de différents phosphogypse dont celui étudié et celle de l'hémihydrate pur ( $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ ).

Le phosphogypse contient du cadmium en très faible quantité.

### LES DIFFÉRENTS PROCÉDÉS DE VALORISATION D'UN PHOSPHOGYPSE

Nous distinguons 3 valorisations, à savoir la production de matière, une utilisation en géotechnique routière, une utilisation dans le domaine agricole que nous analysons à l'aide d'exemples.

#### La production de matière

La première production est la production de plâtre. Parmi les procédés voie sèche, nous avons celui qui consiste d'abord à déshydrater le phosphogypse à la pression atmosphérique, sous faible pression de vapeur d'eau et à une température de 150°C environ pour obtenir de l'hémihydrate b qui est ensuite chauffé vers 500°C pour obtenir l'anhydrite [2]. Parmi les procédés voie humide, nous avons celui qui consiste à développer la croissance cristalline de l'hémihydrate a par ajout d'activateurs de croissance (magnésium, strontium) à du phosphogypse placé dans un autoclave pendant 7 heures sous une pression de vapeur d'eau de 2 bars et à un pH de 11 [3]. Mais le gypse produit contient trop d'impuretés.

Le phosphogypse peut être utilisé dans la production de ciment soit en tant que composant, soit en tant qu'adjuvant. Sous forme de composant, il est associé à de l'argile et du sable pour former un cru. Mais la quantité de phosphogypse consommée est faible à cause des actions négatives du  $P_2O_5$ ,  $SO_3$  et  $MgO$ . La teneur en  $P_2O_5$  ne doit pas excéder 2,5 % [4]. Sous la forme d'adjuvant soit au moment de la fabrication du clinker [5] soit mélangé au ciment où il joue le

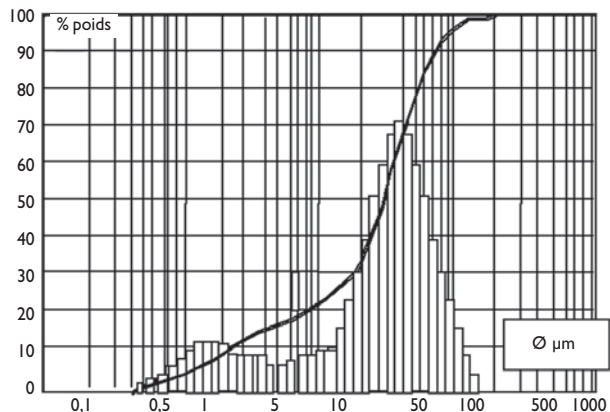


Figure 3 : Courbe granulométrique (g. laser)

**Tableau I : Les éléments majeurs dans le phosphogypse**

Origine	CaO (%)	SO <sub>3</sub> (%)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	SiO <sub>2</sub> (%)	Na <sub>2</sub> O (%)	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (%)	CaSO <sub>4</sub> .2H <sub>2</sub> O (%)
Phosphog. étudié	29,95	41,20	0,12	0,77	0,21	1,41	88,6
Phosphog. Maroc (1)	32,17	46,10	0,12	0,93	0,37	0,94	98,8
Phosphog. Kola (2)	32,0	45,5	0,17	0,6	0,17	0,9	97,8
Phosphog..Floride (2)	31,8	45,9	0,16	1,8	0,3	1,00	97,6
Gypse pur	31,81	45,46					100,00

(1) Analyse récente d'un autre échantillon de phosphogypse de Jorf-Lasfar

(2) voir biblio.[18]

rôle de régulateur de prise du ciment Portland. Dans les deux cas, le phosphogypse doit être broyé et le ciment n'est pas de bonne qualité à cause des impuretés qui retardent la prise et diminuent la résistance aux jeunes âges des bétons [6]. Le phosphogypse peut servir à faire du gypsonat dans lequel il joue le rôle d'activateur de prise du laitier. Le gypsonat est obtenu après un séchage du phosphogypse, une pulvérisation d'une solution de soude et un démottage. [7].

Du SO<sub>2</sub> peut être produit en réduisant le phosphogypse par du coke en proportion respective 94 % et 6 %. Le tout est porté à 1100°C dans un réacteur à lit fixe [8]. La production de SO<sub>3</sub> est obtenue par réduction du phosphogypse par du coke en présence d'argile. Le mélange est porté entre 900 et 1100°C dans un four rotatif duquel sort le SO<sub>3</sub>. Les impuretés contenues constituent des éléments pénalisants [9].

**L'utilisation en géotechnique routière.**

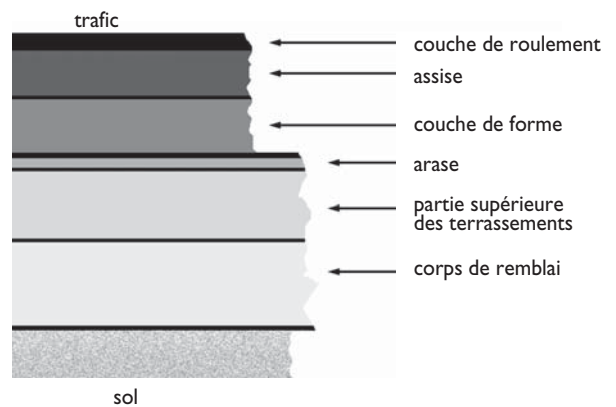
Des études ont été menées sur l'utilisation du phosphogypse dans la confection de chaussée, de chapes autolisantes et dans la stabilisation des sols.

La confection d'une chaussée a été étudiée en relation avec sa structure (figure 4).

Les études menées sur la confection du corps du remblai que ce soit au laboratoire, au stade semi-industriel et à l'échelle industrielle avec des essais pilotes, ont montré que le phosphogypse n'est pas un bon matériau à cause de sa sensibilité à l'eau et de sa propension à se fissurer bien que certaines de ses propriétés mécaniques intrinsèques soient suffisantes. En effet le phosphogypse compacté à l'Optimum Proctor Modifié (OPM) suivant la norme NF P 94 093 et pour lequel la masse volumique sèche du phosphogypse est 1,41 g/cm<sup>3</sup> pour une humidité de 17 %, présente une résistance au cisaillement caractérisée par un angle de frottement de 35° et une cohésion de 40 KPa, une résistance à la compression de 0,18 MPa avec des éprouvettes de 8 cm de diamètre et d'élanement 2 [10] et 0,25 MPa avec des éprouvettes de 7,7cm de diamètre et d'élanement 2 [11]. Concernant le tassement nous remarquons des résultats divergents avec les essais œdométriques. Pour Moussa, le phosphogypse se comporte comme le limon. Il ne présente pas de tassement à long terme à l'opposé de Vautrain [12] qui assimile le phosphogypse à un sol à forte compression secondaire. De plus des études menées sur le phosphogypse saturé montre que les propriétés mécaniques de ce dernier chutent fortement [10][13], en particulier le tassement est trois fois supérieur. Ce comportement négatif du phosphogypse est plus

évident avec les essais pilote menés au stade semi-industriel et industriel sur des remblais expérimentaux avec l'apparition d'une fissuration verticale, perpendiculaire à l'axe du remblai et répétitive. Le remblai est haché.

Une étude a été menée par Puiatti [14] sur l'utilisation du phosphogypse dans la confection de la couche de forme de chaussée routière. Il propose un mélange à 93 % de phosphogypse et 7 % de ciment dont les propriétés mécaniques sont suffisantes pour une telle utilisation. De plus, bien que la couche de forme ait une faible probabilité d'être submergée, les essais effectués sur des éprouvettes saturées, montrent que la perte de résistance est faible.



**Figure 4 : Structure d'une chaussée**

Dans les études menées sur la confection de l'assise, le phosphogypse a été utilisé soit en tant que matériau complémentaire au liant principal, soit en tant qu'activateur de prise. Les conclusions expérimentales sont positives mais les quantités de phosphogypse utilisées sont faibles, quelques pour-cents du liant.

Pour la confection de chapes autolisantes, le phosphogypse a été transformé en gypcement ou ciment de gypse puis mélangé à du sable en proportions respectives 30 et 70 %. Le gypcement est obtenu en chauffant à 300°C le phosphogypse pendant 40 minutes puis en le refroidissant brutalement à 20°C [15]. Le produit obtenu est une anhydrite a dont la résistance à la compression est de 40 MPa. Les chapes autolisantes ont une résistance à la compression de 20 MPa, un faible retrait 0,2 mm/m par comparaison à des mortiers de chape à base de ciment.

Pour la stabilisation des sols le phosphogypse est mélangé à parts égales à de la chaux vive. Il réagit avec la chaux pour se transformer en semi-hydrate. La quantité de phosphogypse

utilisé pour une épaisseur de 2 cm et une largeur de 24 m de chaussée est estimée à 480 m<sup>3</sup>/km de route.

### L'utilisation agricole

De façon générale, le phosphogypse a été utilisé pour traiter des sols qui ont de fortes concentrations en éléments alcalins dans des zones arides cultivées. En Californie 22,4 tonnes par hectare ont été épanchées la première année puis une tonne les années suivantes avant l'interdiction de l'EPA, à cause de la présence de radium dans le phosphogypse [16]. De façon particulière, il a été utilisé pour la culture de la cacahuète pour laquelle le sol doit être légèrement acide, à raison de 2 tonnes à l'hectare tous les 2 ans [17]. Du sulfate d'ammonium a été aussi produit.

En conclusion, il ressort de cette synthèse bibliographique que :

- pour envisager une valorisation matière du phosphogypse, il faut tenir compte des dépenses énergétiques de broyage et/ou de calcination et de la présence des impuretés,
  - la valorisation en géotechnique routière avec la confection de la couche de forme permet de grande consommation de phosphogypse avec un apport de ciment qui est néanmoins faible,
  - la valorisation du phosphogypse en agriculture est limitée dans l'espace et dans le temps.
- Notre choix s'est porté sur la valorisation en géotechnique routière avec la recherche d'un matériau naturel pouvant remplacer le ciment pour la confection de la couche de forme.

### PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES DE L'ÉCHANTILLON DE PHOSPHOGYPSE DE L'UNITÉ DE JORF LASFAR

Afin de nous assurer de l'opportunité de la valorisation en géotechnique routière, nous avons mené des essais à la fois sur le phosphogypse brut sorti usine et sur un mélange phosphogypse brut/limon. Le limon est le matériau naturel que nous avons retenu pour remplacer le ciment que Puiatti a utilisé pour confectionner la couche de forme. Dans une première partie nous présentons les résultats de compactage et de cisaillement obtenus sur le phosphogypse brut et leur comparaison avec des études similaires menées par Moussa [10]. Dans la partie suivante, nous présentons les résultats de compression simple sur le phosphogypse brut et le mélange ainsi que les compléments explicatifs de l'amélioration de la résistance.

### Les essais de compactage et de cisaillement du phosphogypse brut.

Pour l'étude du compactage, nous avons appliqué la norme NF P 94 093 correspondant à l'essai Proctor Modifié. Pour cet essai, la masse de l'échantillon a été de 3,5 kg, la granulométrie inférieure à 5 mm et l'humidité variable suivant l'essai. L'échantillon a été mis dans un moule de 10,16 cm de diamètre, de 11,7 cm de hauteur puis compacté avec une dame de 5,08 cm de diamètre, d'une masse de 4,54 kg,

chutant 25 fois d'une hauteur de 45,7 cm. Le résultat se présente sous la forme d'un diagramme avec en ordonnée la masse volumique sèche du phosphogypse compacté, en abscisse l'humidité de l'essai. Dans la figure 5 sont présentés les résultats obtenus sur notre échantillon ainsi que ceux de Moussa. La comparaison des résultats montre qu'ils sont similaires. L'Optimum Proctor Modifié (OPM) est décrit dans notre cas par une masse volumique sèche de 1,45 g/cm<sup>3</sup> et une humidité de 16,5 %, comparable à ceux de Moussa, respectivement 1,41 g/cm<sup>3</sup> et 17 %.

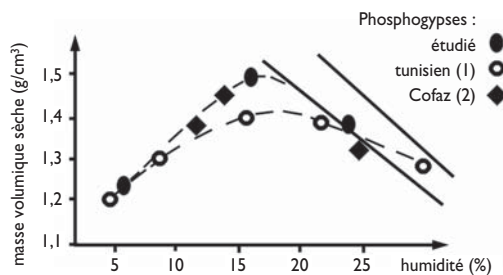
Pour les essais de cisaillement effectués sur le phosphogypse compacté à 3 humidités : 6 %, 19 % et 24 % nous avons utilisé la boîte de Casagrande de section carrée (6 cm x 6 cm) composée d'une partie inférieure fixe et d'une partie supérieure mobile sur laquelle sont appliquées une force normale qui ramenée à la surface de la section représente la contrainte normale N et la force de traction qui génère la rupture par cisaillement et qui ramenée à la surface de la section représente la contrainte de cisaillement t. Les résultats retenus sont les résistances au cisaillement décrivant les courbes intrinsèques que nous présentons sur la figure 6 suivant N et t. Nous adjoignons les résultats de Moussa qui apparaissent similaires.

### Etude d'un mélange phosphogypse/limon

Cette étude fait suite aux travaux de Puiatti sur l'utilisation du phosphogypse dans la confection de la couche de forme. Notre recherche a consisté à trouver un matériau naturel à faible coût qui pourrait remplacer le ciment. Après une analyse de la carte géologique du secteur de Jorf-Lasfar en relation avec des remarques sur le comportement du phosphogypse avec d'autres matériaux, nous avons retenu un limon particulier qui provient de la formation quaternaire. Il a l'apparence d'un sable caillouteux de couleur rougeâtre. A l'aide d'analyses granulométriques, diffractométriques et chimiques, nous en avons déduit la composition. Les deux tranches les plus importantes (40 % poids chacune) sont les tranches supérieures à 500 µm et inférieure à 32 µm. Elles ont à peu près la même composition, à savoir :

- 68 % d'ankérite [2CaCO<sub>3</sub>(Mg Fe) CO<sub>3</sub>]
- 20 % de quartz [SiO<sub>2</sub>]
- 12 % de calcite [CaCO<sub>3</sub>]

La tranche intermédiaire (20 % en poids) se compose de 40 % d'ankérite, 50 % de quartz et 10 % de calcite. Connaissant les masses volumiques sèches des trois minéraux, nous en avons déduit la masse volumique sèche du limon sans poro-



(1) Moussa, 82 [10] (2) Cofaz, in Moussa, 82 [10]

Figure 5 : Courbes de compactage

sité. Elle est égale à 2,78 g/cm<sup>3</sup>. Elle sera utilisée pour les estimations de porosité.

Trois mélanges ont été constitués dont les proportions respectives en phosphogypse et limon sont : 80 %-20 %, 70 %-30 % et 60 %-40 %. Des essais de compactage et de résistance ont été effectués sur ces mélanges et sur le phosphogypse brut (mélange 100 %-0 %).

Les essais de compactage effectués suivant la norme NF P 94 093 ont donné les résultats décrits dans la figure 7. L'humidité qui est généralement utilisée pour caractériser l'essai est remplacée par la porosité pour tenir compte des différences de masses volumiques des mélanges. Excepté le mélange 60%-40%, les autres présentent le même OPM ce qui signifie que de faibles quantités de limon ne modifient pas le comportement au compactage du phosphogypse.

Les essais à la compression ont été effectués sur des éprouvettes de 6 cm de diamètre et d'éclatement 2 carottées en voie sèche dans le mélange juste après compactage à l'OPM. Les éprouvettes ont été comprimées avec une presse de 15 tonnes et une vitesse de déformation de 0,1 mm/mn. Les courbes contraintes / déformations des différents mélanges sont reportées dans la figure 8.

Les mélanges ont des comportements différents par rapport au phosphogypse brut. Ils ont un coefficient de déformation plus élevé et résistent plus. Nous expliquons ce résultat par une attaque de la calcite du limon par l'acide sulfurique restant dans le phosphogypse et une précipitation du dihydrate formé à la jonction des minéraux de gypse et d'ankérite. Les clichés au MEB (figure 9) décrivent ces jonctions. Il s'ensuit une fermeture de la porosité et une réduction de la perméabilité d'un facteur de 0,5 à 10-1 quand nous comparons le phosphogypse brut avec le mélange 80 %-20 %. La perméabilité à l'OPM du phosphogypse brut égale 10-8 m/s chute à 10-9 m/s pour le mélange 80 %-20 %. Elle a été mesurée suivant la norme Afnor à l'aide d'un perméamètre à charge constante.

De plus la calcite du limon réagissant avec l'acide sulfurique restant dans le phosphogypse neutralise une grande partie de l'acidité résiduelle de ce dernier. Si nous comparons nos résultats de résistance à ceux obtenus par Puiatti à 2 jours nous obtenons les mêmes variations entre le phosphogypse brut et le mélange optimal. Dans notre cas, la résistance du phosphogypse brut est de 0,25 MPa et celle du mélange phosphogypse-limon de 0,85 MPa. Pour Puiatti, pour le phosphogypse brut, elle est de 0,13 MPa et de 0,87 MPa pour le mélange phosphogypse-ciment.

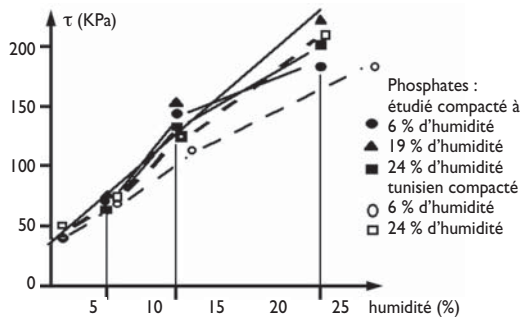


Figure 6 : Courbes intrinsèques (cisaillement)

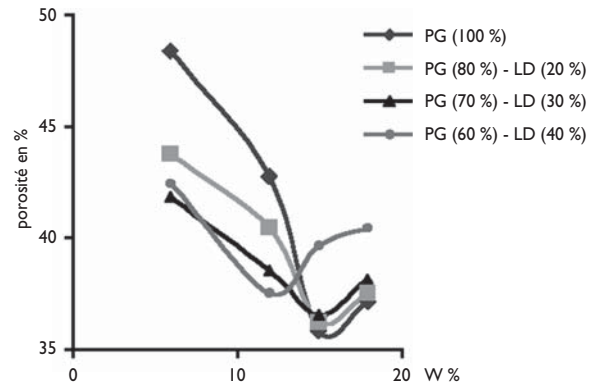


Fig 7 : Courbes de compactage

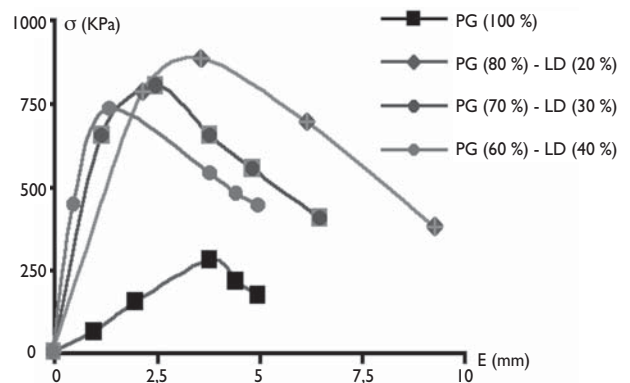


Fig 8 : Courbes de résistance à la compression

## CONCLUSION

Les études bibliographiques et expérimentales effectuées au laboratoire sur un échantillon de phosphogypse de Jorf Lasfar orientent la valorisation de ce produit vers une utilisation dans la confection de couche de forme de chaussée et la partie supérieure de terrassement puisque :  
 – premièrement la résistance d'un mélange de 80 % de phosphogypse et de 20 % d'un limon approche en grandeur celle

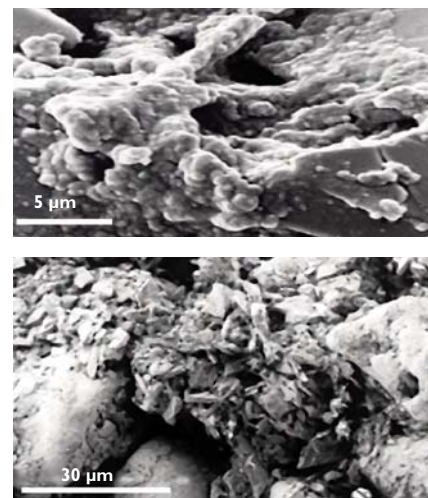


Figure 9 : Photographies MEB de la liaison phosphogypse-limon

trouvée par Puiatti pour un mélange de 97 % de phosphogypse et 7 % de ciment, mélange utilisable pour la confection de couche de forme.

– deuxièmement le phosphogypse sera valorisé en grande quantité avec un matériau naturel à faible coût d'exploitation.  
– troisièmement la calcite du limon réagissant avec l'acide sulfurique restant neutralise une partie de l'acidité du phosphogypse

**Moutaouakil A. \***, **\*\***, **Pineau J.L. \***, **Lahlou K.\*\*\***

\* LEM-ENS Géologie, Nancy

\*\* Faculté des Sciences, Rabat, Maroc

\*\*\* Ecole Hassania des travaux publics, Casablanca, Maroc.

#### Remerciements :

les auteurs remercient Le Centre d'études et de recherche des phosphates minéraux (CERPHOS) à Casablanca, Maroc, pour sa collaboration.

#### Références bibliographiques

- [1] Slack et Adane, in Delporte C. L'anhydrite naturelle de Faulquemont et sa valorisation sous forme de béton sulfate - Thèse de doctorat 3<sup>e</sup> cycle Univ. Nancy I – 151 p. (1988)
- [2] Rouis B. Contribution à l'utilisation de sous produits industriels. Application au cas du phosphogypse de Sfax. Thèse de doctorat, Université Joseph Fourier, Grenoble (1991).
- [3] Genin C., Blazy P., Yvon J. *Transformation des phosphogypses en plâtre (a hémihydrate)*. Industrie Minéral - Les Techniques pp. 394-405 mai (1984)
- [4] Gutt-Nixon in Rouis, 1982
- [5] Charfi Forati F., Bouaziz J., Belayouni H. (2000) *Valorisation du phosphogypse de Tunisie en vue de son utilisation comme substituant au gypse naturel dans la fabrication du ciment* - DST n°20 pp. 24- 32
- [6] Murakami, 1968 in Murat M. La valorisation du sulfate de calcium résiduaire. Journées Insa Lyon pp.1-22 (1975)
- [7] Prandi E. Les emplois dérivés du phosphogypse en technique routière et en génie civil. Colloque Int. sur l'utilisation des sous-produits et déchets dans le génie civil Paris - pp. 237-240 (1978).
- [8] Smolenskaya in Baraka A. Décomposition réductrice du gypse naturel de la région de Safi au Maroc, en vue de la récupération du soufre élémentaire. DES, Faculté sciences, Rabat, Maroc (1988)
- [9] Anonyme *Recovering sulphur values from by-product phosphogypsum*. Revue Phosphorus and Potassium n° 113 pp. 23-26 (1986)
- [10] Moussa D. Etude des caractéristiques mécaniques du phosphogypse de la SIAPE Thèse doct. ing. spécial. génie civil - Université Paul Sabatier Toulouse 135 p. (1982)
- [11] Blivet J.C. Caractéristiques mécaniques d'éprouvettes reconstituées de phosphogypse - Laboratoire régional de Rouen - rapport interne (1976)
- [12] Vautrain J., Gestin F. *Utilisation du phosphogypse en remblai, étude de compressibilité*. Numéro spécial VII Min. Environnement, le phosphogypse, Paris nov. pp. 110-116 (1978)
- [13] Quibel A. Remblais expérimentaux au CER de Rouen, étude de pollution et du comportement mécanique. Numéro spécial VII Min. Environnement, le phosphogypse, Paris nov. pp. 99-109 (1978)
- [14] Puiatti D. Utilisation du phosphogypse en accotement et en couche de forme. Colloque Int. sur l'utilisation des sous-produits et déchets dans le génie civil Paris - pp. 241-247 (1978)
- [15] Couturier J. Procédé de traitement de sulfate de calcium et liant hydraulique ainsi obtenu. Brevet d'invention n° d'enregistrement national : 97 10930 de l'INPI (Bulletin 1999/09).
- [16] Anonyme, *The gypsum dilemma*-Revue Phosphorus and Potassium n° 146 pp. 32-37 (1996)
- [17] Anonyme *The utilization of phosphogypsum in agriculture* - Revue Phosphorus and Potassium n° 113 pp. 23-26 (1981)
- [18] Gorle D. Residual sulfates. - Int. Conference on the use of by-products and waste in civil engineering - pp. 45-68, Paris nov. (1978)
- [19] OCP – plaquette d'informations sur les activités de l'OCP - 8 p. (1999).



## NOTE AUX AUTEURS

**Déchets, Sciences & Techniques revue francophone d'écologie industrielle publie les résultats de travaux réalisés dans le domaine de l'écologie industrielle, principalement consacrés aux déchets, aux sols pollués et aux impacts environnementaux. Les articles peuvent être proposés par des laboratoires scientifiques ou relater des expériences industrielles. La revue est ainsi le lieu privilégié des échanges entre recherche et expertise.**

Les thématiques abordées sont les suivantes :

- 1) Approche bio-physico-chimique du déchet;
- 2) Procédés de traitement des déchets;
- 3) Caractérisation et traitement des sols et sites pollués;
- 4) Évaluation environnementale et management des systèmes et des procédés;
- 5) Ecotoxicologie, toxicologie et santé;
- 6) Économie, droit, sociologie, évaluation des politiques publiques;
- 7) Communication, formation.

### CONDITIONS GÉNÉRALES DE PUBLICATION

- 1 - La langue de rédaction est le français. Les articles doivent être accompagnés d'un résumé en français de 100 mots environ, et d'un résumé en anglais plus conséquent (200 mots environ).
- 2 - Présentation des articles. L'article type comportera environ 5 pages imprimées incluant textes, figures et références soit l'équivalent de 15 000 signes. Les textes originaux doivent être expédiés sur disquette en mentionnant les logiciels utilisés.
- 3 - L'auteur doit adresser une version papier en 3 exemplaires pour le comité scientifique, comportant tableaux, figures, ou photographies éventuels. Les fichiers de tableaux ou de figures existants doivent être joints sur la disquette avec originaux papier.

L'article doit impérativement comporter les éléments suivants :

- Titre;
  - Nom, qualité et coordonnées de l'auteur ou des auteurs;
  - Résumés en français et anglais;
  - Mots clés;
  - Texte principal;
  - Références;
  - Nomenclatures (symboles et unités).
- 4 - L'article doit être accompagné d'une note précisant, la ou les thématique(s) souhaitée(s) par l'auteur, selon la répartition de la revue (de 1 à 7).

5 - Les mises au point et revues bibliographiques sont acceptées dans les mêmes conditions que les articles.

6 - La revue est également ouverte :

- aux résumés de thèse;
- aux résumés de mémoires de DEA et DESS;
- aux rapports de stage de Mastère;
- aux informations sur les colloques et séminaires relatifs aux thématiques de la revue.

### ENVOI DES ARTICLES

Coordinatrice et contact: Frédérique Dutel - Insa de Lyon - Domaine scientifique de la Doua - Bâtiment Sadi Carnot - LAEPSI, 9 rue de la Physique - 69621 Villeurbanne cedex - Tél: (33) 4 72 43 82 42 - Fax: (33) 4 72 43 87 17 - Mél: [fdutel@insa-lyon.fr](mailto:fdutel@insa-lyon.fr)

Les articles de la revue sont consultables sur le site [pro-environnement.com](http://pro-environnement.com)

**Rédacteur en chef:** Pierre Moszkowicz, Directeur du Laboratoire d'analyse environnementale des procédés et des systèmes industriels (Laepsi) à l'Insa de Lyon.