

Extrait de « VALORISATION DES DECHETS ET SOUS-PRODUITS INDUSTRIELS EN GENIE CIVIL », Luc COURARD, Département d'Architecture, Géologie, Environnement et Construction, Université de Liège, 181p.

I.1 Les gypses résiduaire

I.1.1 Introduction

Parmi les déchets et les sous-produits industriels, les gypses résiduaire posent, par l'importance des quantités stockées et de celles produites annuellement, un des plus grands problèmes d'environnement. En Belgique notamment, la production de gypses résiduaire se situe aux environs de 2 à 2,5 tonnes par an, dont 1/5 seulement est actuellement valorisé, entre autres dans l'industrie cimentière et plâtrière. Le restant doit être mis à la décharge sur des terrains de versage dont la disponibilité va en décroissant : décharge coûteuse, inesthétique et parfois dangereuse pour l'environnement biologique (Fig. 2.36).



Figure 2.36. : dépôt de gypse résiduaire d'Engis (Prayon-Rupel) - transport effectué par camion [2]

I.1.2 Origines des gypses résiduaire

I.1.2.1 Classification des types de gypses résiduaire

Il existe différents types de gypses résiduaire, provenant non seulement de l'industrie chimique, mais aussi de procédés de neutralisation et de désulfuration de gaz. Une classification des différents types de gypses résiduaire a été proposée. Cette classification repose principalement sur l'origine du gypse résiduaire. Le tableau 2-22 ci-après reprend quelques-unes des dénominations principales pour la Belgique.

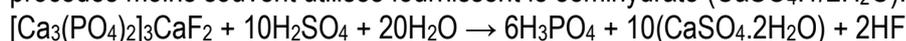
Tableau 2-22 : classification des types de gypses résiduaire selon leur origine [2]

Origine	Dénomination
Production d'acide phosphorique	Phosphogypse
Production d'acide fluorhydrique	Fluorogypse
Production d'acide borique	Borogypse
Neutralisation de gaz contenant du SO ₂ et du SO ₃ ou des solutions de H ₂ SO ₄	Sulfogypse

Le phosphogypse est de loin le gypse résiduaire le plus abondant.

1.1.2.2 Obtention du phosphogypse

Le phosphogypse se forme lors de la fabrication, par procédé humide, d'acide phosphorique à partir de phosphates provenant généralement du Maroc, de Russie ou de Floride. Les minéraux pulvérisés sont traités à l'acide sulfurique, procédé qui entraîne principalement la formation d'acide phosphorique, d'acide fluohydrique et de sulfate de calcium. La réaction se déroule en différentes phases au cours desquelles le sulfate de calcium peut passer par différents stades d'hydratation. La méthode la plus appliquée donne lieu à la cristallisation finale du sulfate de calcium sous forme de dihydrate (CaSO₄.2H₂O), d'autres procédés moins souvent utilisés fournissent le semihydrate (CaSO₄.1/2H₂O).



Le schéma global de fabrication est donné à la figure 2.37:

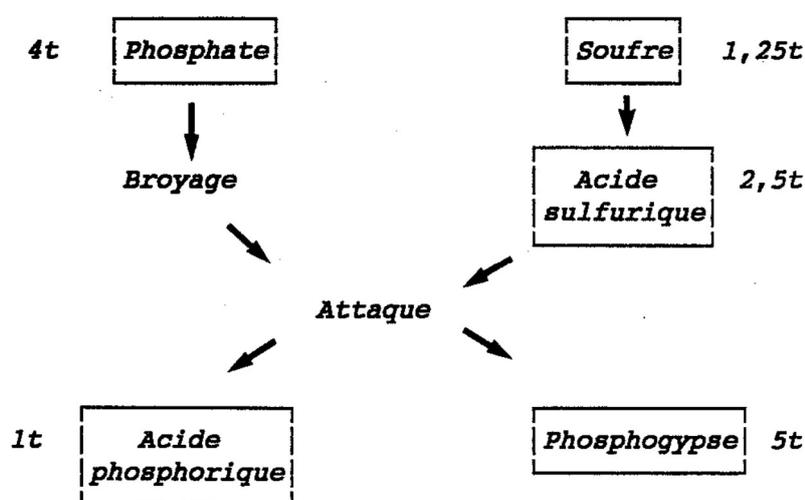


Figure 2.37 : principe de production des phosphogypses

Le phosphogypse peut, avant sa sortie de l'usine, subir différents traitements (lavage, neutralisation à la chaux, déshydratation ou mise en suspension,...) en fonction de son utilisation future et du moyen de transfert utilisé (voie hydraulique notamment).

I.1.3 Caractéristiques et propriétés du phosphogypse

Après filtrage, les phosphogypses se présentent sous la forme d'un sable humide très fin dont les caractéristiques varient en fonction de l'origine du minerai et du procédé d'attaque. Ces derniers déterminent également la morphologie cristalline et la présence plus ou moins importante d'impuretés solubles ou insolubles (fluor, métaux lourds, matières organiques).

Dans l'hypothèse d'une réutilisation en remblai, les phosphogypses doivent systématiquement avoir été neutralisés, pour porter le pH à au moins 5, par exemple par addition de chaux avant ou au moment de la mise en dépôt (Fig. 2.38). La neutralisation limite sensiblement les risques de pollution par dissolution des éléments ayant une certaine toxicité. La solubilité du gypse au contact des eaux superficielles ou internes est normalement de l'ordre de 2 g/l mais des valeurs jusqu'à 4 g/l sont observables en milieu acide.

Au plan géotechnique, on peut compléter l'analogie de comportement en exprimant que les phosphogypses ressemblent à un sable fin qui serait anguleux, propre, friable et léger :

- masse volumique des grains : 2,3 t/m³;
- l'optimum Proctor Normal : entre 1,25 et 1,40 t/m³, pour des teneurs en eau entre 25 et 17 %;
- sensibilité à l'énergie de compactage importante : l'optimum Proctor Modifié varie entre 1,40 et 1,60 t/m³ pour 20 à 13 % de teneur en eau;
- caractère évolutif marqué pendant les opérations de trituration : le même échantillon compacté à plusieurs reprises dans le moule Proctor voit sa densité augmenter de 10 % en valeur relative par fragmentation des grains après 4 compactages successifs;
- indices portants immédiats (IPI) à la teneur en eau OPN : favorables (de l'ordre de 15 à 20). Ils chutent à moins de 5 pour une teneur en eau supérieure à 1,2 WOPN. Le phosphogypse n'est alors plus traficable. La sensibilité à l'eau peut se traduire par une chute plus brutale de la portance à droite de WOPN lorsque le matériau a été davantage trituré;
- caractéristiques mécaniques : angles de frottement interne au moins égaux à 40° et cohésion de l'ordre de 10 à 20 kPa;
- perméabilités : de l'ordre de 10⁻⁶ m/s à la densité OPN;
- les succions et les perméabilités montrent que des mouvements d'eau interne peuvent se produire. Il importe de ne pas mettre en place le matériau directement sur un sol plus imperméable sans matériau de transition (pour éviter que le pied de remblai ne soit porté à saturation);
- érodabilité importante : des venues d'eau localisées peuvent être destructives;
- essais oedométriques : forte compression secondaire, ce qui traduit une évolution potentielle des tassements dans le temps.

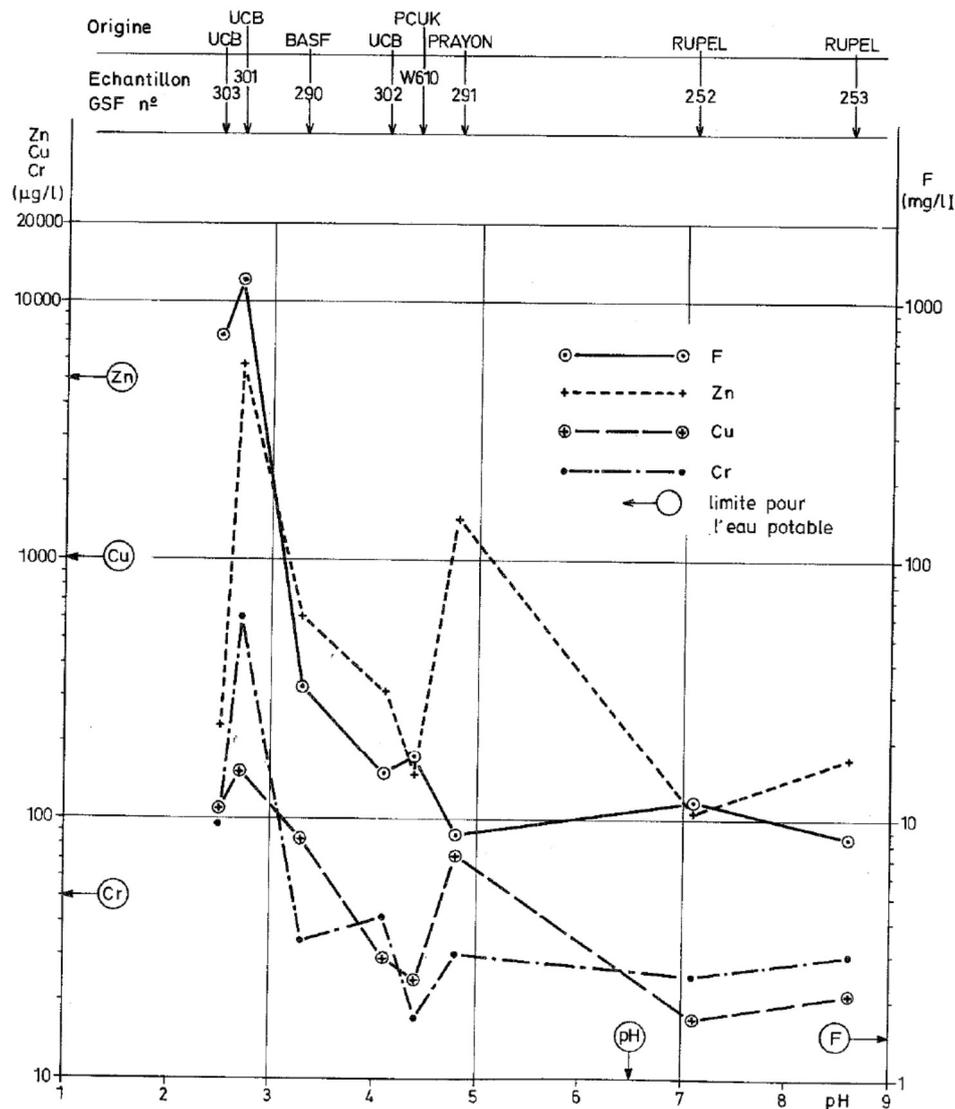


Figure 2.38 : effet du pH sur la lixiviation d'un certain nombre de composants des phosphogypses [2]

I.1.4 Applications du phosphogypse dans l'industrie de la construction

Pour la plupart de ses applications dans le secteur de la construction, le phosphogypse est transformé en semi-hydrate ($\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$) ou en anhydrite (CaSO_4). Il est utilisé moins souvent sous forme de dihydrate ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), comme filler ou encore comme agrégat dans les mélanges contenant du laitier granulé.

L'utilisation du phosphogypse est basée sur l'idée de profiter des caractéristiques physiques et chimiques du produit :

- **physiques**: ce sont des matériaux fins susceptibles d'entrer dans des mélanges comme granulats ou même comme correcteur de granulométrie pour des sables naturels;
- **chimiques**: le sulfate de calcium est connu pour modifier la nature des réactions de cristallisation des laitiers de haut-fourneau en milieu basique, ainsi que celle des cendres volantes de houille.

Dans le cadre du bâtiment à proprement parler, on peut envisager les applications suivantes :

- phosphoplâtre;
- béton léger;
- panneaux non portants.

La production de *phosphoplâtre* présente parfois des difficultés à cause des impuretés contenues dans le phosphogypse. L'acidité et la présence des phosphates restants influent fortement sur la prise du plâtre et sur l'adhérence du papier au plâtre. Ces problèmes peuvent être évités par une épuration préalable du phosphogypse ou encore par un mélange avec des agrégats avant la transformation en semi-hydrate. En Belgique, une part non négligeable du phosphogypse est utilisée pour l'industrie du plâtre.

D'autre part, le phosphogypse peut également être utilisé dans de nouveaux types de *béton léger* à base d'argile ou de schiste expansé et de laitier granulé. La prise du laitier granulé est accélérée par un mélange de phosphogypse et d'hydroxyde de sodium.

Des expériences ont été menées, notamment en Tunisie [7] en vue d'incorporer les phosphogypses dans la fabrication de briques. Des mélanges de 45% de phosphogypses, 45% de sable et 10% de ciment semblent donner des résultats intéressants (Fig. 2.39). L'absorption d'eau reste également limitée à 12%. Il reste évidemment à prouver la durabilité des produits avec le temps (intempéries, cycles d'humidification séchage, ...etc).

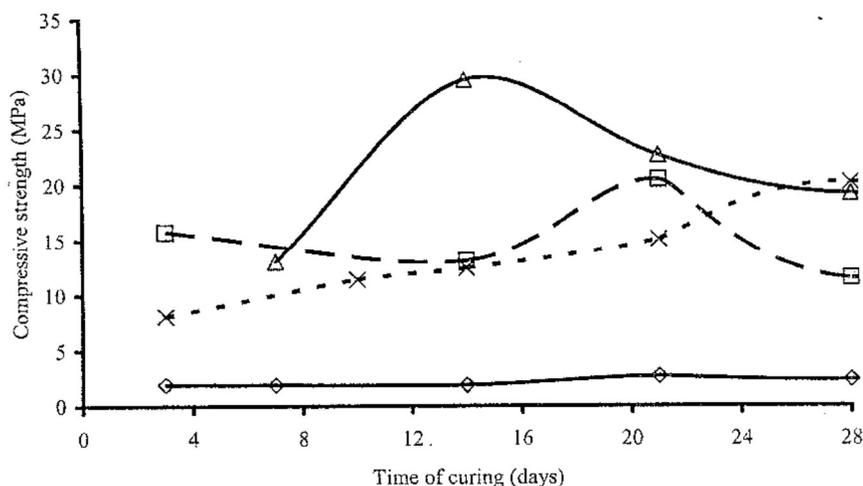


Figure 2.39. : évolution de la résistance en compression de briques contenant du phosphogypse (PHG), du sable (S) et du ciment (C), en fonction de la teneur en ciment et du temps de cure [7]
(□ PHG- S-15%C - x PHG- S-20%C - ◇ PFG - Δ PHG-S-10%C)

Finalement, il a été montré que des *panneaux non portants* et des *panneaux destinés à l'isolation thermique* peuvent être fabriqués à partir de mélanges de phosphogypse avec, par exemple, des résines à l'urée-formaldéhyde. La proportion de phosphogypse dans ces mélanges peut varier entre 30 et 90 %.

Malgré les nombreuses possibilités d'utilisation de ce matériau en construction, la Belgique connaît un important excédent de phosphogypses: environ 80 % de la production reste inutilisés.

I.1.5 Applications dans le domaine routier

L'utilisation du phosphogypse peut se faire sous forme de:

- remblais, dont le volume est un facteur intéressant;
- couches de forme, après traitement au ciment;
- accotements.

1.1.5.1 Emploi dans le domaine des terrassements

Diverses études ont été menées en Belgique par le Centre de Recherches Routières [1] [2] et en France par divers laboratoires régionaux des Ponts et Chaussées [3] [4] [5].

Les principaux problèmes qui apparaissent lors de la réalisation de remblais à base de phosphogypses proviennent de l'apparition de fissures de retrait importantes (jusqu'à 6 cm de largeur et 2 m de profondeur), ainsi que du lessivage possible par l'eau souterraine ou l'eau de ruissellement pénétrant au cours du remblai par les fissures de retrait (Fig. 2.40). Ceci entraîne des tassements importants ainsi que la création de cavités souterraines : les eaux de ruissellement ou internes du remblai risquent également d'être chargées en sulfates, en fluor et en métaux lourds.



Figure 2.40. : dépôt de gypse résiduaire à Oudenburg (UCB) - transport effectué par camion (remarquez la fissure de retrait) [2]

Les expériences globalement positives d'utilisation des phosphogypses en remblai permettent de dresser un résumé des dispositions dites minimales à prendre en considération. Ces dispositions sont un cadre, mais ne suppriment cependant pas une étude appropriée à chaque cas considéré, pour confirmer l'aptitude du sous-produit à constituer des remblais, et à adapter ou compléter au besoin les dispositions énoncées :

- le site ne doit pas être sensible à la pollution par les eaux internes ou par les eaux de ruissellement;
- la hauteur raisonnable des remblais en gypse est de 5 mètres;
- ils ne doivent pas être construits juxtaposés à des points durs;
- les pentes de talus de 1/1 conviennent;
- la partie supérieure en gypse doit être hors gel dans l'ouvrage final;
- le phosphogypse doit avoir plus de 50 % de grains $> 50 \mu\text{m}$, et doit être neutralisé à $\text{pH} \geq 5$. Les identifications physico-chimiques et géotechniques sont nécessaires et comportent notamment l'analyse des constituants, le pH, un essai de lixiviation, la granulométrie-sédimentométrie, la teneur en eau naturelle, l'essai Proctor-IPi avec répétition sur le même échantillon, ainsi que les essais classiques de mécanique des sols : ϕ et c à divers états, essais oedométriques;
- la teneur en eau de mise en oeuvre doit être inférieure à 20 %;
- la période de construction favorable se situe entre avril et octobre. Des dispositions anti-poussières peuvent être toutefois nécessaires;
- la base du remblai doit être hors de venues d'eau;
- des planches de vérification au début de l'exécution du chantier sont utiles pour fixer définitivement les conditions de mise en oeuvre (teneur en eau, densité, portance);
- les parties de talus doivent être retaillées. Il est utile de s'assurer d'une technique de mise en végétation probante sur ce matériau;
- les eaux de ruissellement sur la plateforme doivent être collectées;
- en cas d'existence de fissuration, celle-ci peut être maîtrisée par mise en place d'un géotextile tissé à faible allongement en partie supérieure du remblai ou par une feuille de protection en polyéthylène avec couche de terre arable;
- la couche de forme doit être mise en place sans délai après la réalisation du remblai, et avoir de bonnes caractéristiques d'imperméabilité.

On notera qu'un remblai en phosphogypse peut également présenter un intérêt dans le cadre des remblais allégés dans la mesure où sa masse volumique humide à la teneur en eau d'équilibre avoisine les $1,50 \text{ t/m}^3$ alors que pour les sols traditionnels les masses volumiques sont de l'ordre de 2 à $2,20 \text{ t/m}^3$.

1.1.5.2 Emploi dans les couches de fondation et les couches de forme

Dans ce cas, un liant hydraulique est ajouté au phosphogypse de façon à atteindre les performances mécaniques minimales exigées pour ce genre d'application.

Différentes structures ont été expérimentées en utilisant du sable, du gravier, des cendres volantes, de la soude ou du laitier. Les figures ci-après présentent quelques mélanges analysés, avec les performances en compression déterminées en laboratoire. Ces mélanges ont été utilisés en couche de base dans la structure décrite sur les figures 2.41 et 2.42.

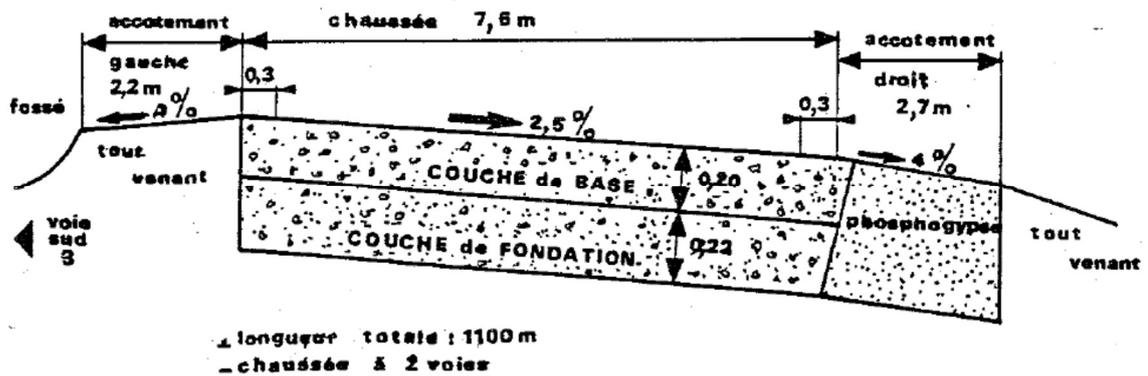


Figure 2.41 : utilisation de phosphogypses en couche de base

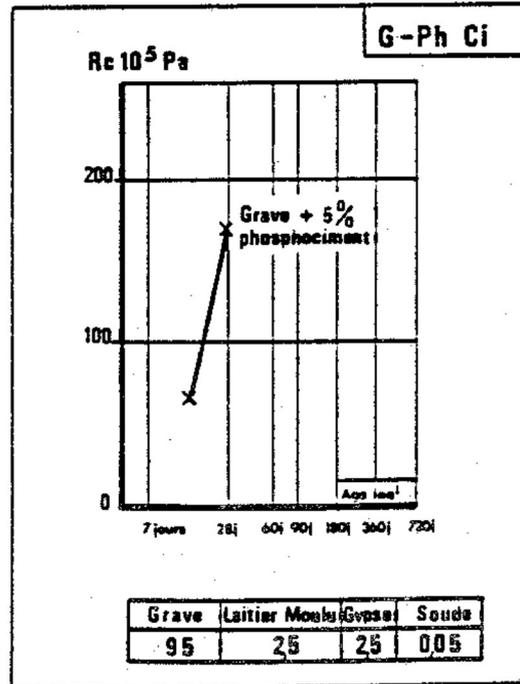
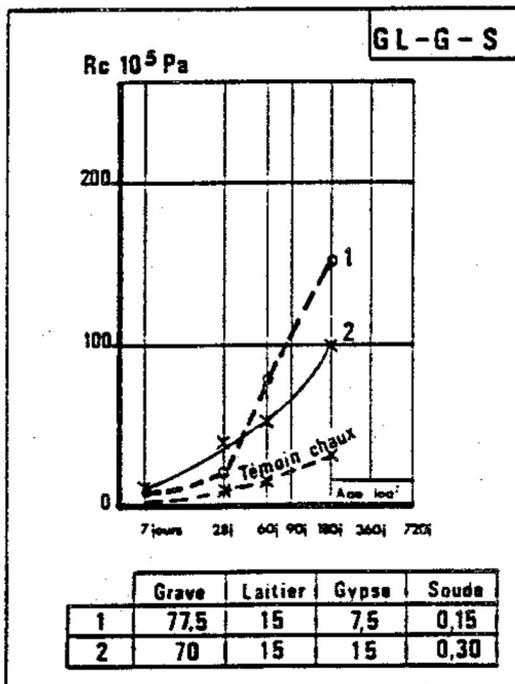
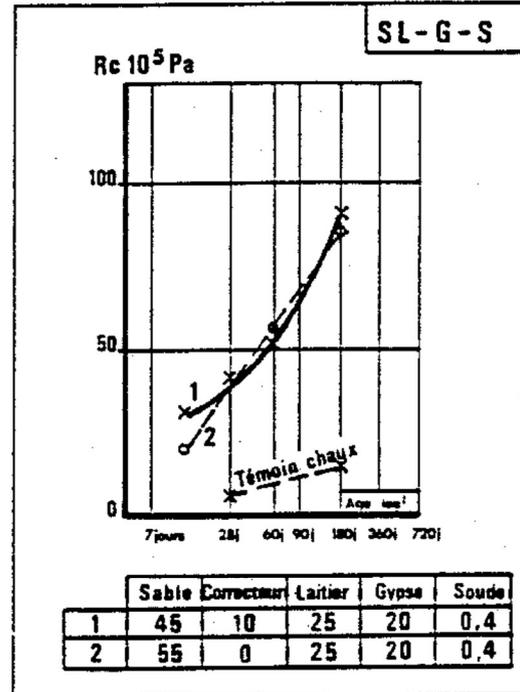
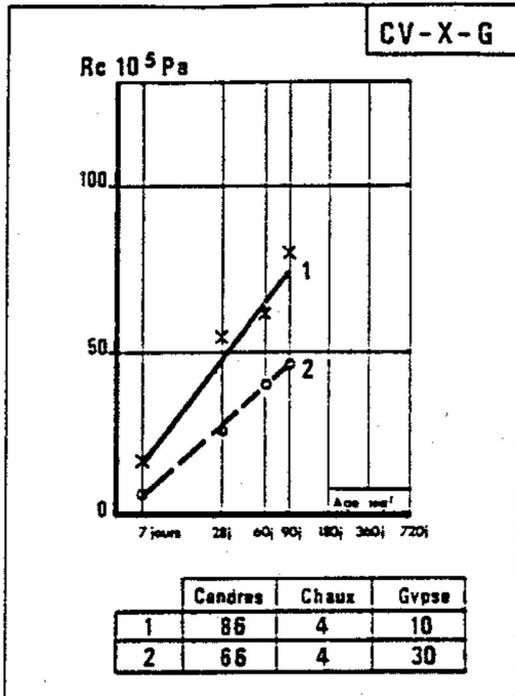


Figure 2.42 : performances mécaniques de mélanges à base de phosphogypses

Les observations effectuées sur ces diverses planches expérimentales ont laissé apparaître, après quelques jours, des phénomènes de gonflement, se manifestant par la présence de "taupinières" ou des flambements à la jonction transversale entre deux structures, comme si la structure avait accumulé son potentiel de gonflement en un seul point. Il en a résulté une dégradation de type "bourrelet" et un glissement d'une couche sur l'autre.

Ces phénomènes sont relativement brutaux et rapidement stabilisés. Sur d'autres chantiers, on a mesuré jusqu'à 12 cm d'allongement transversal (1 %) de la couche contenant un mélange sable-laitier-chaux-phosphogypse par rapport à la couche sous-jacente. Cet allongement, obtenu 4 semaines seulement après la mise en oeuvre, a provoqué la rupture du fossé bétonné adjacent par poussage de son échelle verticale.

Dans tous les cas, l'eau est, à l'évidence, l'ennemi mortel de ces matériaux où les quantités de sulfate et de calcium sont telles qu'il y a formation très intense de sels d'ettringite expansifs: ces différents matériaux ont développé leur potentiel gonflant lorsque l'eau des pluies a pénétré les couches comportant ces mélanges.

La valorisation du phosphogypse en couche de forme et de fondation ne peut donc être envisagée qu'avec la plus grande circonspection.

1.1.5.3 Emploi dans les accotements

Dans le cadre de l'utilisation des phosphogypses dans les accotements de chaussées, outre les problèmes liés au transport et à la mise en oeuvre, il est important d'étudier l'influence et l'efficacité d'un écran de surface (hydrocarboné ou végétal). Les différentes expérimentations menées sur ce type d'application ont conduit aux conclusions suivantes :

- il est nécessaire de prendre un maximum de mesures de protection, pour éviter la formation d'un nuage de poussières dangereux (effet de brouillard) et polluant au transport comme à la mise en oeuvre;
- lorsque le phosphogypse n'est pas buté, côté fossé, il se produit, au moment du compactage, un fluage du matériau vers le fossé qui gêne considérablement le compactage et accentue les risques de pollution par les eaux circulant dans le fossé. Cette butée pourrait être réalisée par le matériau naturel de l'accotement repoussé au préalable en cordon le long du fossé puis compacté;
- il est nécessaire que le phosphogypse ne présente pas une teneur en eau trop élevée (< 25 %) afin de permettre le réglage à la niveleuse et éviter le collage au fond des bennes des camions;
- l'imperméabilisation paraît indispensable pour des raisons de tenue à l'érosion et aux sollicitations mécaniques.

Ici encore l'utilisation de phosphogypse ne donne pas entière satisfaction.

1.1.6 Bibliographie

- [1] VERHASSELT A., POSSIBILITES DE TRAITEMENT DE DIVERS GYPSES RESIDUAIRES. CENTRE DE RECHERCHES ROUTIERES, CR 20/83, 1983.
- [2] GORLE D., LE PHOSPHOGYPSE COMME MATERIAU DE REMBLAI ROUTIER. CENTRE DE RECHERCHES ROUTIERES, CR 28/85, 1985.
- [3] ANDRIEUX M., UTILISATION DU PHOSPHOGYPSE EN ASSISE DE CHAUSSEES. VALORISATION DES DECHETS ET SOUS-PRODUITS EN GENIE CIVIL. PARIS, DECEMBRE 1992.
- [4] FEVRE M. AND ALL., LES GYPSES RESIDUAIRES. VALORISATION DES DECHETS ET SOUS-PRODUITS EN GENIE CIVIL. PARIS, DECEMBRE 1992.
- [5] COLOMBEL J.M., EMPLOI DES PHOSPHOGYPSES EN ASSISES DE CHAUSSEES. VALORISATION DES DECHETS ET SOUS-PRODUITS EN GENIE CIVIL. PARIS, DECEMBRE 1992.
- [6] GUARDIANI G.M. ET AL., EXPERIMENTATIONS ON THE UTILIZATION OF GYPSUM YIELDED BY ENEL DESULFURIZATION PLANTS. SARDINIA 89, SECOND INTERNATIONAL LANDFILL SYMPOSIUM.

- [7] BELAÏBA, A. ET AL., STUDIES ON DEVELOPMENT OF TUNISIAN PHOSPHOGYPSUM FOR CONSTRUCTION BRICKS. INT. RILEM CONFERENCE ON THE USE OF RECYCLED MATERIALS IN BUILDING STRUCTURES, 8-11 NOV. 2004, BARCELONA, SPAIN.