

# Exemple d'étude de traitement pour déterminer l'emploi d'un sol en couche de forme

Michel KERGOËT

Ingénieur

Chef de la section Terrassements et construction des chaussées

Laboratoire régional des Ponts et Chaussées de l'Est parisien

## RÉSUMÉ

L'article illustre, sur un exemple concret, la méthodologie d'étude de traitement pour couche de forme décrite dans le guide technique « *Traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques. Application à la réalisation des remblais et des couches de forme* » (GTS).

Le cas présenté est celui d'un projet ouvert à variantes sur le sol et le liant.

Dans une première étape, l'article montre l'intérêt de l'essai d'aptitude au traitement pour faire une première sélection du couple sol-liant. La présentation se poursuit par une description de l'étude du comportement mécanique du mélange et montre, en particulier, la forte pénalisation induite par une insuffisance de compacité. Il est alors montré comment l'entreprise a pu éviter cette pénalisation en justifiant, lors de l'épreuve de convenance, une méthodologie d'exécution garantissant la compacité « fond de couche ».

L'article présente enfin un dernier volet concernant le volume, la durée et le coût de l'étude ainsi que l'intérêt économique de l'optimisation du dosage en liant.

**MOTS CLÉS :** 32 - Couche de forme - Compactage - Traitement des sols - Chaux - Ciment - Liant hydraulique routier.

## Présentation

Pour la plupart des études de tracés routiers, les choix stratégiques de constitution des plates-formes de chaussées deviennent de plus en plus importants dans le contexte de la préservation des ressources en matériaux de qualité et du souci économique et environnemental de limiter les transports de matériaux sur la voirie existante.

Dans ce cadre, une gestion en autarcie des besoins en matériaux de remblai et de couche de forme est un objectif du mouvement des terres du projet. L'étude présentée ici en est une illustration.

Il s'agit d'un chantier de déviation situé en région parisienne dont les terrassements intéressent des volumes à extraire relativement limités (de l'ordre de 80 000 m<sup>3</sup>) constitués essentiellement de limons A<sub>2</sub> et de sables fins pollués B<sub>5</sub>, suivant la classification du guide technique « *Réalisation des remblais et des couches de forme* » (GTR) [1].

Ces sols se prêtent habituellement bien au traitement et ont souvent été utilisés régionalement pour la réalisation de couches de forme (limons A<sub>2</sub> essentiellement).

Les besoins estimés par le bureau d'études, sur la base d'une couche de forme de 35 cm d'épaisseur, sont de l'ordre de 10 000 m<sup>3</sup> et pourraient donc être largement couverts par l'un ou l'autre des sols à extraire.

Par ailleurs, les identifications géotechniques réalisées dans le cadre de l'étude générale du tracé montrent que ces deux sols présentent des caractéristiques suffisamment homogènes pour que l'on puisse envisager leur emploi en couche de forme (dispersion de  $\rho_{dOPN} < 8\%$ ).

Les volumes de couche de forme concernés étant relativement limités, la solution de base adoptée par le bureau d'études est une solution largement éprouvée régionalement. Elle consiste à retenir une formulation de traitement

des limons A<sub>2</sub> par 2 % de CaO et 7 % de ciment CPJ CEM II A 32,5 en application du tableau C1-V du guide technique « *Traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques. Application à la réalisation des remblais et des couches de forme* » (GTS) [2].

Le classement de plate-forme PF<sub>3</sub> est alors obtenu pour 35 cm de limons traités de classe mécanique 5 (arase traitée à la chaux de classe AR<sub>2</sub>).

Le dossier de consultation des entreprises a donc été établi avec cette solution de base, en ouvrant le marché à variante sur le matériau (choix possible du sable B<sub>5</sub>), sur le liant et son dosage en demandant à l'entreprise une justification de la formulation comportant une étude de traitement de niveau 2, suivant les indications du GTS.

La classe de plate-forme (PF<sub>3</sub>) et l'épaisseur de la couche de forme (35 cm) sont fixées (si l'on se réfère au GTS, tableau C3-I, il s'agit d'un cadre de marché voisin du type 2).

L'entreprise adjudicataire du marché a donc profité de cette ouverture à variante pour étudier l'alternative entre les deux sols (A<sub>2</sub> et B<sub>5</sub>), le remplacement du ciment par un liant hydraulique routier (LHR) et l'optimisation du dosage en liant.

Pour répondre à ces objectifs, l'étude a été conduite selon les modalités du niveau 2 défini dans le GTS (fig. 1).

## Étude de formulation

### Vérification de l'aptitude du sol au traitement

La première étape de l'étude consiste à vérifier l'aptitude du sol au traitement sur une formulation de base préétablie pour ce test.

Dans le cas présent, les formulations testées sont les suivantes :

- > sol A<sub>2</sub> traité par 2 % CaO + 6 % LHR ;
- > sol B<sub>5</sub> traité par 1 % CaO + 6 % LHR.

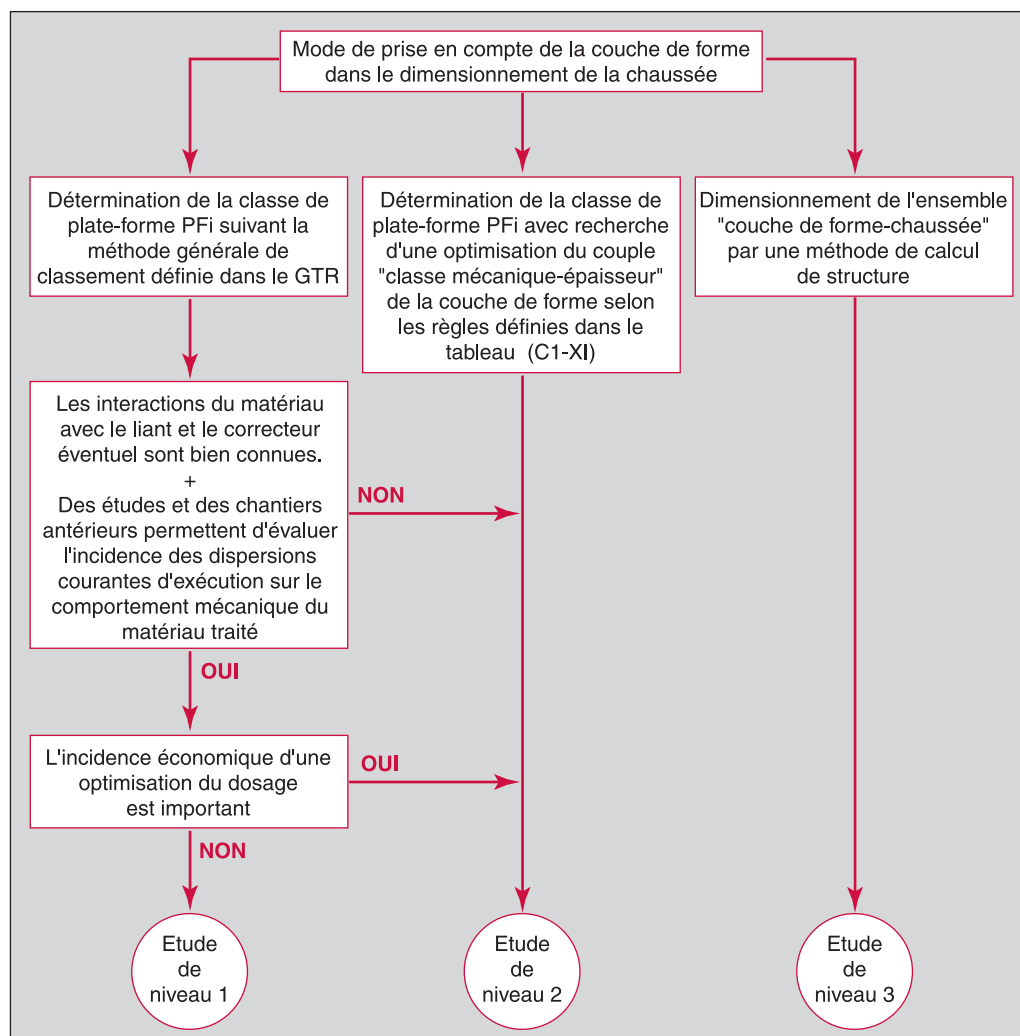


Fig. 1 - Logigramme définissant le niveau de l'étude de formulation à engager.

Le dosage en LHR a été choisi au vu de l'expérience régionale et le dosage en chaux a été modulé pour tenir compte de l'argilosité de ces matériaux. Les essais d'évaluation de l'aptitude de ces sols au traitement, effectués selon la norme NF P 94-100 [3], ont conduit aux résultats suivants, replacés dans la grille de jugement du GTS représentée sur la figure 2.

La formulation de sols A<sub>2</sub> traités satisfait aux critères d'aptitude (faible gonflement volumique G<sub>v</sub> et bon développement des résistances R<sub>tb</sub>) et peut donc être retenue pour la suite de l'étude. Ce n'est en revanche pas le cas de la formulation à base de sols B<sub>5</sub> dont les résultats du test d'aptitude sont considérés comme douteux. Il a donc été décidé de ne pas engager l'étude avec le sol B<sub>5</sub>.

*Cet exemple montre l'intérêt et la sélectivité de cet essai, qui a permis rapidement (en sept jours) d'orienter la suite de l'étude et d'en limiter le volume. Il reste cependant à généraliser la pratique de l'essai afin de valider ou d'amender ultérieurement les seuils proposés dans le guide.*

### Étude des performances mécaniques

L'étude des performances mécaniques a ensuite été conduite selon la méthodologie décrite dans le GTS pour une étude de niveau 2 en faisant varier la teneur en liant dans la plage 5 à 7 %.

Les principaux résultats sont résumés sur les figures 3, 4 et 6.

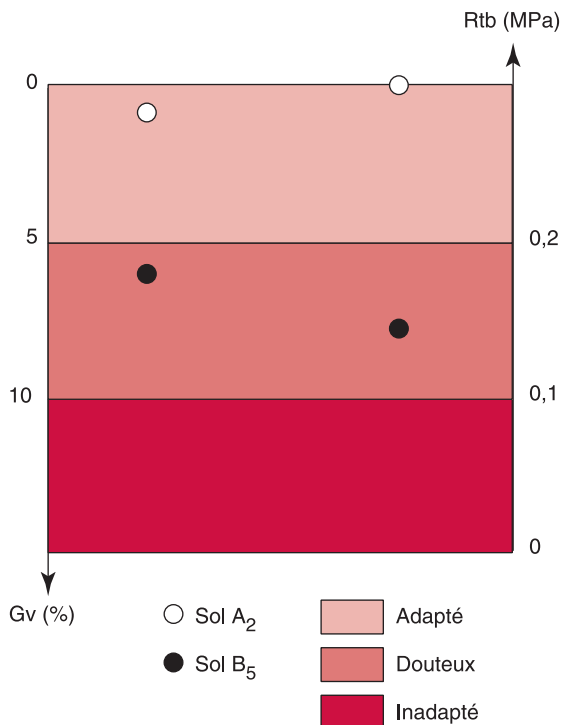
### Étude des caractéristiques mécaniques et de comportement au jeune âge

On peut observer sur les figures 3 et 4 que le critère de résistance minimale R<sub>c</sub> = 1 MPa fixé par le GTS pour autoriser la circulation sur la couche traitée est atteint après quatorze jours environ pour le dosage de 5 % ou dès sept jours si l'on retient un dosage minimal estimé à 6 % de liant.

Par ailleurs, quel que soit le dosage, la tenue à l'immersion au jeune âge est satisfaisante.

### Étude des caractéristiques mécaniques à long terme

L'étude des caractéristiques mécaniques a été réalisée pour trois dosages en liant (5 %, 6 % et 7 %), sur des éprouvettes 5 × 5 (fig. 5) sur lesquelles ont



a. Grille de jugement de l'aptitude au traitement.

b. Essai d'évaluation de l'aptitude au traitement. ▶



Fig. 2 - Résultats de l'aptitude des sols A<sub>2</sub> et B<sub>5</sub> au traitement.

été déterminés la résistance en compression diamétrale et le module à vingt-huit jours et quatre-vingt-dix jours.

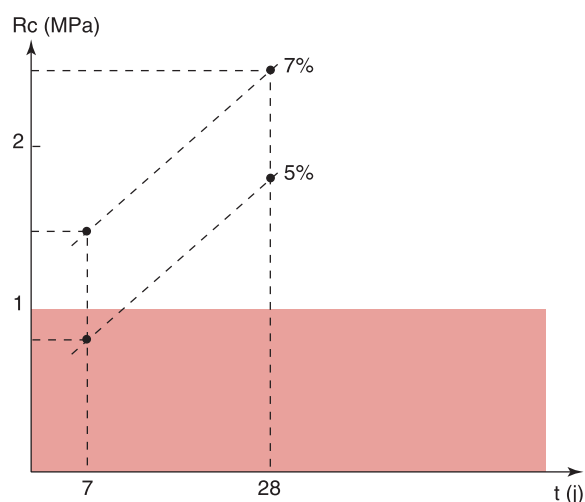


Fig. 3 - Évolution de la résistance en compression en fonction du temps et du dosage en liant.

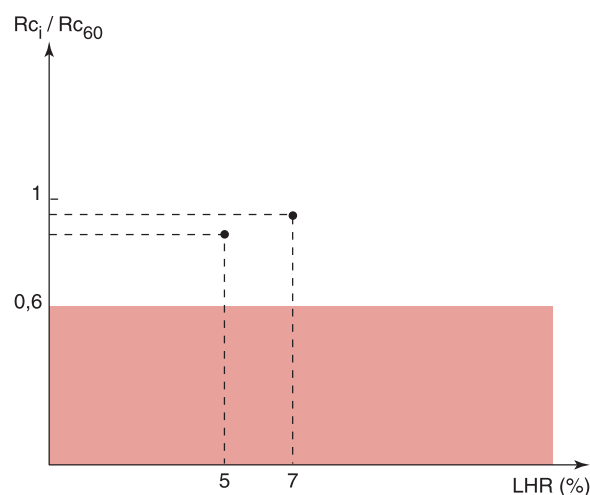


Fig. 4 - Sensibilité à l'immersion en fonction du dosage en liant.



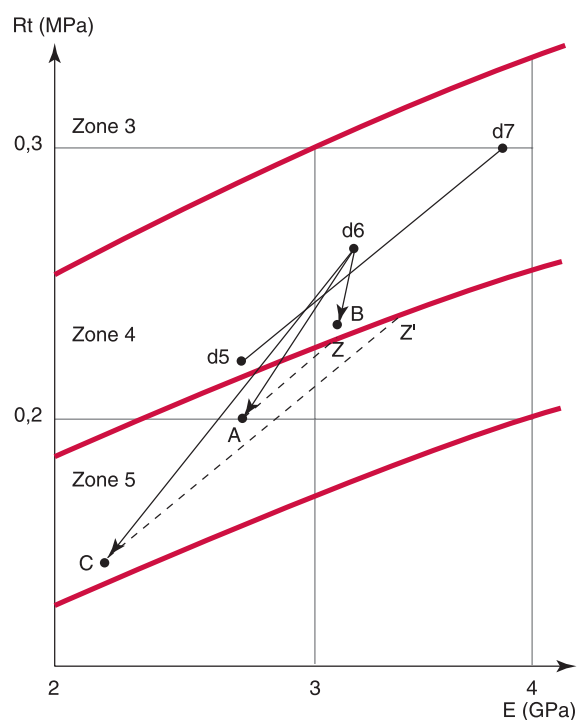
Fig. 5 - Essai  $R_t$ ,  $E$  sur éprouvettes 5 x 5.

La sensibilité aux dispersions d'exécution a été étudiée conformément au GTS à partir de la formule de base (6 %).

Les résultats représentés sur la figure 6 montrent que :

- > les points représentatifs des couples  $R_t$ ,  $E$  des formulations à 5 %, 6 % et 7 % de liant se situent dans la zone 4 visée et sont pratiquement alignés ;
- > l'influence la plus importante des dispersions d'exécution correspond au point C, qui cumule l'effet d'un sous-dosage en liant (5,4 %) et d'un sous-compactage de fond de couche (94 %  $\rho_{dOPN}$ ). Ceci confirme, d'après notre expérience actuelle sur l'étude des sols fins traités, que le sous-compactage est souvent le facteur le plus pénalisant ;
- > l'effet des variations de teneur en eau est surtout sensible en cas de sous-dosage (point A).

Dans le cas présenté, la compensation de l'influence des dispersions d'exécution par ajuste-



| Point | Dosage (%) | Compacité          | État hydrique |
|-------|------------|--------------------|---------------|
| d5    | 5          | 96 % $\rho_{dOPN}$ | $W_{OPN}$     |
| d7    | 7          | 96 % $\rho_{dOPN}$ | $W_{OPN}$     |
| d6    | 6          | 96 % $\rho_{dOPN}$ | $W_{OPN}$     |
| A     | 5,4        | 96 % $\rho_{dOPN}$ | 0,9 $W_{OPN}$ |
| B     | 5,4        | 96 % $\rho_{dOPN}$ | 1,1 $W_{OPN}$ |
| C     | 5,4        | 94 % $\rho_{dOPN}$ | $W_{OPN}$     |

Fig. 6 - Évolution du couple  $R_t$ ,  $E$  en fonction du dosage en liant, de la compacité et de l'état hydrique.

ment du dosage en liant conduit à un ajout important  $\Delta d = \frac{\overline{CZ'}}{d_6 d_7} \# 2 \%$ , ce qui nécessiterait

d'adopter sur le chantier un dosage  $d = d_6 + 2 \%$  = 8 % de LHR.

L'alternative proposée par l'entreprise a consisté à garantir un taux de compactage minimal de 96 % en fond de couche, ce qui pourrait alors permettre d'effectuer le calcul de l'ajustement du dosage en liant à partir du point A et conduirait alors à un

ajout  $\Delta d = \frac{\overline{AZ}}{d_6 d_7} \# 0,7 \%$  se traduisant pour le

chantier par un dosage  $d = d_6 + 0,7 \%$  = 6,7 % de LHR.

L'expérience du Centre d'expérimentation routière (CER), confirmée par de nombreux chantiers, montre qu'il est souvent difficile d'obtenir une bonne densité de fond de couche pour les couches de forme épaisses en sols fins traités.

C'est pourquoi, la proposition de l'entreprise a été retenue sous réserve que la possibilité d'obtenir un taux de compactage en fond de couche suffisant soit vérifiée (objectif  $\cong 98 \%$  de  $\rho_{dOPN}$  en moyenne pour assurer 96 % au minimum).

Cette vérification a été faite lors de l'épreuve de convenance de l'exécution organisée la semaine précédant le début de la mise en œuvre de la couche de forme.

## Épreuve de convenance

L'épreuve de convenance a comporté la réalisation d'une section de couche de forme traitée d'une centaine de mètres, mise en œuvre selon les modalités d'exécution proposées par l'entreprise à la suite d'essais préalables. Les essais avaient en particulier conduit l'entreprise à adopter une mise en œuvre en deux couches de façon à obtenir une bonne densification de la partie inférieure de la couche de forme.

Les modalités retenues comportaient, après compactage de la première couche, un griffage et un arrosage avant la mise en œuvre de la seconde couche, l'ensemble étant réalisé dans le délai de maniabilité du mélange, afin d'assurer un bon collage entre les couches.

La vérification de l'état de compacité obtenu avec cette méthode d'exécution a été faite au moyen de mesures à la double sonde et a mobilisé deux personnes du laboratoire de contrôle extérieur pour le suivi de l'épreuve de convenance et les mesures.

Les profils représentés sur la figure 7 montrent que l'objectif de densité en fond de couche est atteint.

Une telle étude, dont la consistance peut être, a priori, jugée lourde par le lecteur, s'avère en réalité beaucoup moins contraignante qu'il n'y paraît, comme le montrent les estimations mentionnées dans les tableaux I et II.

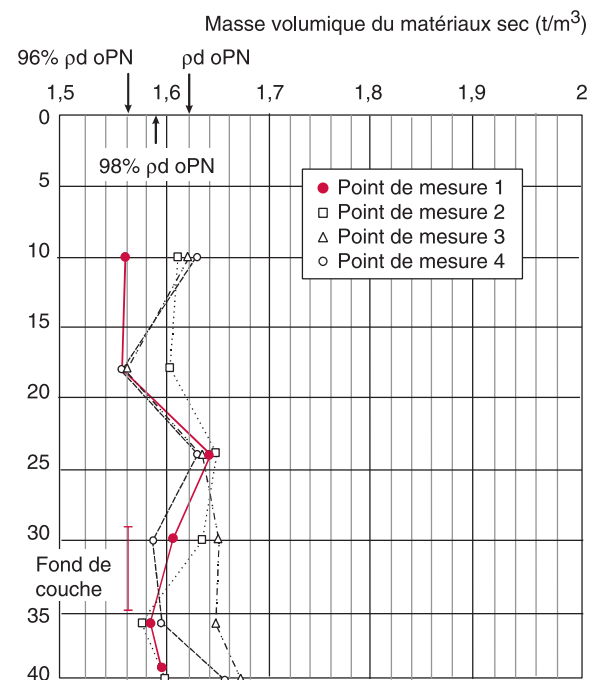


Fig. 7 - Masses volumiques sèches mesurées à la double sonde.

TABLEAU I  
Volume de l'étude (cas du sol A<sub>2</sub> traité)\*

| Phases  | Masse humide de sol (kg) | Masse liant (kg) | Série de trois éprouvettes |
|---|--------------------------|------------------|----------------------------|
| Étude de gisement   | p.m.                     | -                | -                          |
| Identification + Proctor (sol naturel)  | 30                       | -                | -                          |
| Proctor, IPI (sol traité)   | 30                       | 2                | -                          |
| Essai d'aptitude  | 2                        | 0,2              | 2                          |
| R <sub>c</sub> , R <sub>ci</sub>  | 12                       | 0,8              | 8                          |
| R <sub>tb</sub> , E   | 5                        | 0,3              | 6                          |
| Étude de sensibilité  | 3                        | 0,2              | 3                          |
| <b>Total</b>  | <b>82</b>                | <b>3,5</b>       | <b>19</b>                  |
| On approvisionnera par sécurité environ 100 kg de sol et 5 kg de liant.   |                          |                  |                            |
| * Dans le cas d'une étude de traitement d'un sol grenu, pour lequel, il peut être nécessaire de confectionner des éprouvettes 16 x 32, les besoins sont d'un autre ordre (environ 800 kg de sol grenu et 50 kg de liant). |                          |                  |                            |



TABLEAU II  
Durée et coût de l'étude (hors coût des prélèvements)

| Phases   | Durée de l'étude               | Estimation du coût (HT) |
|--|--------------------------------|-------------------------|
| Préparation des matériaux<br>Identifications<br>Proctor, IPI | Environ<br>deux semaines       | 8 à 10 000 F            |
| Essais d'aptitude  | Une semaine                    | 4 à 5 000 F             |
| Essais mécaniques  | Douze semaines                 | 26 à 35 000 F           |
| Exploitation et rapport                                      | Une semaine                    | 7 à 10 000 F            |
| <b>Total</b>   | <b>Environ<br/>quatre mois</b> | <b>45 à 60 000 F</b>    |

## Conclusion

En conclusion, il convient de revenir sur l'importance de l'étude de formulation et de l'épreuve de convenance. Dans le cas de ce chantier :

■ l'étude a permis, dans une première phase, de sélectionner le matériau le plus apte au traitement et d'engager une seule étude de formulation grâce à laquelle l'entreprise a justifié l'emploi d'un

LHR au dosage de 6,7 % (au lieu de 7 % de CPJ 32,5), ce qui représente une économie d'environ 18 F/m<sup>3</sup> de couche de forme compte tenu de l'écart de prix entre le ciment et le LHR à l'époque du chantier (environ 150 F/t) et de l'écart de dosage (0,3 %).

Pour l'ensemble de la couche de forme, qui représente un volume d'environ 10 000 m<sup>3</sup>, le gain se situe à environ 180 000 F, valeur que l'on peut mettre en relation avec le coût de l'étude (50 000 F) et la plus-value pour la mise en œuvre en deux couches (environ 25 000 F).

Le bilan financier reste donc positif même si, dans le cas présenté, le faible volume de couche de forme ne permet pas de minimiser le coût de l'étude, qui est pratiquement un terme fixe de la colonne des dépenses ;

■ l'épreuve de convenance a permis, en particulier, de définir des modalités d'exécution permettant d'obtenir un niveau de compacité en fond de couche justifiant l'hypothèse retenue pour l'étude de formulation.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] GTR, Guide technique « Réalisation des remblais et des couches de forme », LCPC-SETRA, septembre 1992.
- [2] GTS, Guide technique « Traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques. Application à la réalisation des remblais et des couches de forme », LCPC-SETRA, janvier 2000.
- [3] Norme NF P 94-100, Sols : Reconnaissance et essais. Matériaux traités à la chaux et/ou aux liants hydrauliques. Essai d'évaluation de l'aptitude d'un matériau au traitement, août 1999.

### ABSTRACT

#### An example of treatment design for use of a soil as a capping layer

M. KERGOËT

This paper uses a practical example to illustrate the capping layer treatment design methodology described in the document "Traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques. Application à la réalisation des remblais et des couches de forme (GTS)" (Treatment of soils with lime and/or cementitious binders. Application to the construction of embankments and capping layers).

The case described here involves a project where alternative soils and binders are possible.

To begin with the paper demonstrates the benefits of the suitability for treatment test in order to select a soil-binder combination. Next, it describes the study of the mechanical performance of the mix and shows, in particular, the severe consequences of inadequate compaction. It then demonstrates how the contractor was able to avoid these prejudicial effects and justifies the application, during the suitability test, of a methodology that guarantees the degree of compaction at the base of the layer.

Finally, the final section of the paper deals with the volume, duration and cost of the study and the economic benefits of optimizing binder content.