

# Exemple d'application d'une technique de traitement par homogénéisation du gisement pour constituer une couche de forme

Jean BIMBARD

Chargé d'études  
Groupe Géotechnique

Laboratoire régional des Ponts et Chaussées de Lyon

## RÉSUMÉ

Le présent article montre qu'un matériau naturel limono-argileux très grossier (0/300 mm + blocs erratiques) et d'une homogénéité toute relative (nature et état hydrique variables) peut constituer, après avoir subi une préparation et un traitement adaptés, une couche de forme performante. Après caractérisation de la formation géotechnique concernée, ce document met en évidence l'amélioration progressive des matériaux au cours des différentes phases d'exécution (sélection, extraction, criblage, stockage, reprise, etc.) aboutissant, *in fine*, à un produit parfaitement traitable en place avec des moyens courants.

En conclusion, dans le contexte présent, le surcoût relatif aux opérations de préparation ne s'est pas avéré rédhibitoire.

**MOTS CLÉS :** 22 - Sol de fondation - Traitement des assises - Alluvion - Granulométrie (granularité) - Mesure - Homogénéité - Coût.

## Présentation

Les terrassements de la déviation d'Aigueblanche, réalisés dans le cadre de l'aménagement à 2 x 2 voies de la RN 90 entre Albertville et Moutiers, intéressent essentiellement des formations à dominante gravelo-limoneuse (cônes de déjection et moraines).

Le contexte technico-économique rendait l'option « couche de forme traitée » concurrentielle, ce qui a conduit à retenir cette technique pour l'ensemble de la déviation (soit un volume couche de forme d'environ 20 000 mètres cubes).

L'expérience régionale acquise dans l'emploi des alluvions glaciaires en couche de forme traitée (routes et autoroutes) militait pour le choix de ces dernières comme matériaux de base.

Les principales difficultés rencontrées dans l'exploitation des moraines résultent :

- > de la présence de gros éléments ( $200 < D < 400$  mm + blocs erratiques),
- > des variations granulaires dans la composition du matériau,
- > de l'existence de poches humides avec circulations d'eau plus ou moins pérennes,
- > de la compacité élevée de la formation (glaciaire surconsolidé),
- > de la grande sensibilité de ces sols à l'eau après destruction (comportement de type limon),
- > de la nécessité d'un ajout d'eau important (près de  $20 \text{ l/m}^2$ ) pour atteindre la teneur en eau optimale du mélange (sol + liant).

Au bénéfice de ces matériaux, il y a lieu de citer l'obtention, après mise en œuvre, de masses volumiques sèches

élevées ( $\rho_d > 2,1 \text{ t.m}^{-3}$ ) conduisant à des performances mécaniques remarquables.

Par ailleurs, il a été observé :

- l'existence très limitée de phénomènes parasites en cours ou après la mise en œuvre (feuilletage, faïençage, fissuration, etc.),
- sous réserve d'une réelle maîtrise de la teneur en eau, un comportement physique immédiat acceptable autorisant une mise en œuvre aisée ( $I_{PI}$  à  $w_{OPN} \geq 20$ ).

Ainsi, pour permettre une utilisation rationnelle des alluvions glaciaires en couche de forme traitée, il apparaît nécessaire :

- de limiter la dimension maximale des gros éléments (D) à 120 mm (possibilité technique actuelle),
- d'imposer un fuseau granulométrique relativement serré pour obtenir une plage de variation de  $\rho_{dOPN}$  acceptable (étendue des mesures/moyenne des mesures  $\geq 6 \%$ ),
- d'éliminer, dès l'extraction, les principales causes de difficulté voire d'échec (lentilles de limon

pur, poches ou filons de matériaux très humides, blocs erratiques de grandes dimensions, etc.).

## Phases de préparation – Constatations

### État initial du matériau

Des sondages de reconnaissance (benne preneuse à percussion, pelle mécanique, sondages carottés, etc.), complétés par des essais d'identification, ont permis de localiser préalablement les zones renfermant les matériaux les plus aptes à une utilisation en couche de forme.

Le fuseau granulométrique et le comportement à l'eau des alluvions glaciaires sont représentés sur les figures 1 et 2. Leurs caractéristiques géotechniques sont les suivantes :

- dimensions des particules : 50 à 300 mm (hors blocs erratiques) ;
- pourcentage de fines : 10 à 42 % ;
- limite de liquidité :  $w_L = 20$  à 30 ;
- indice de plasticité :  $I_P = 6$  à 12 ;

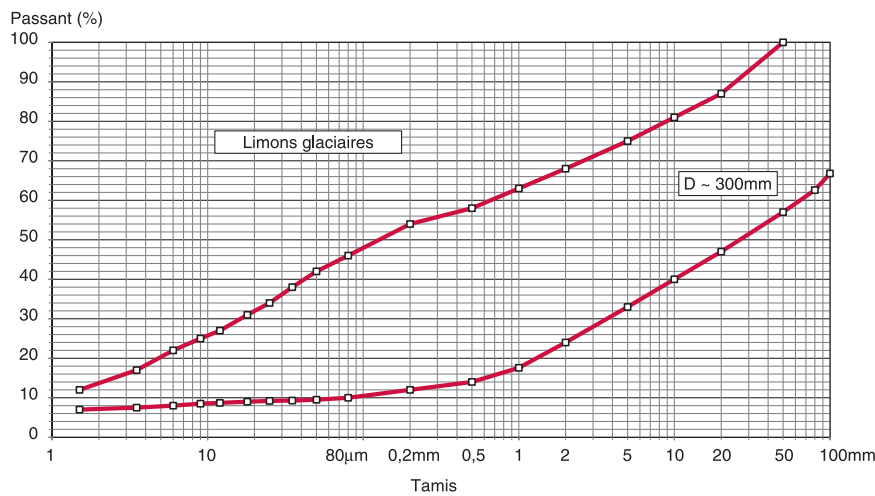


Fig. 1 - Fuseau granulométrique du matériau naturel avant extraction.

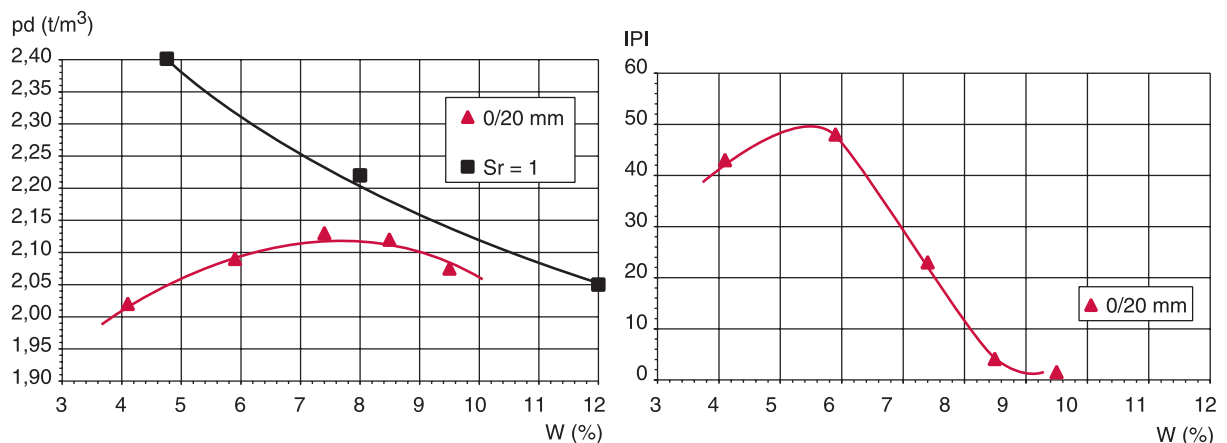


Fig. 2 - Étude du comportement du sol naturel.

- > valeur de bleu  $V_{BS} = 0,3$  à  $0,4$  g/100 g ;
- > teneur en eau naturelle de la fraction 0/20 mm :  $w_n = 6,5$  à  $16$  % ;
- > masse volumique sèche en place :  $\rho_d = 2,3$  à  $2,5$  t/m<sup>3</sup> (terrain glaciaire surconsolidé) ;
- > caractéristiques à l'optimum Proctor normal :  $\rho_{dOPN} = 2,13$  t/m<sup>3</sup> ;  $w_{OPN} = 7,5$  % ;  $I_{PI} = 20$  ;  $I_{Pimax} = 50$  (pour  $w = 5,5$  %) ;
- > état hydrique en place :
  - en 1984 (trente-deux mesures) : teneur en eau moyenne =  $11,2$  % ; écart type =  $2,2$  % ; coefficient de variation =  $20$  % ;
  - en 1987/1988 (vingt-sept mesures) : teneur en eau moyenne =  $8,9$  % ; écart type =  $1,8$  % ; coefficient de variation =  $20$  % .



Fig. 3 - Déstructuration du glaciaire.

### Remarque

*L'extraction de ces matériaux très compacts nécessite soit un défonçage préalable, soit l'usage de matériels très puissants. Dans le cas présent, où il est recherché un ameublissement poussé des déblais conduisant à la libération des gros éléments et à une déstructuration totale de la fraction fine, le foisonnement et le gerbage des alluvions glaciaires ont été réalisés au bouteur lourd (fig. 3).*

### Constatations relevées en cours de préparation

#### Effet sur la granularité du matériau

Afin de mettre en évidence l'évolution granulaire des matériaux aux différents stades de leur préparation, des analyses granulométriques ont été exécutées par les laboratoires présents sur le chantier (CEBTP et LRPC de Lyon).

Les résultats de ces essais ont permis de dresser les fuseaux granulométriques représentés sur la figure 4.

#### Sol naturel avant extraction (0/80 nat)

Pour permettre une comparaison aisée des divers fuseaux, nous avons établi celui relatif au sol naturel à partir de chaque courbe granulométrique écrêtée fictivement à 80 mm (nombre de valeurs : 16).

Ce fuseau des matériaux en place révèle une importante dispersion granulaire. En effet, on peut observer sur la figure 4 que la famille de sols obtenue s'étend des matériaux fins graveleux (% fines > 50) aux graves sablo-limoneuses (% fines  $\approx 14$ ).

Une réduction de cet écart apparaît donc indispensable.

#### Sol extrait criblé mécaniquement (0/80 stock)

Après foisonnement et gerbage, le matériau repris a subi un criblage mécanique au moyen de deux types d'installation différents, pour satisfaire aux besoins du chantier.

#### ■ Crible à barreaux associé à une « sauterelle » équipée d'un tamis vibrant

Dans ce cas, les matériaux sont déversés sur une grille à barreaux inclinée (écartement de 100 mm)

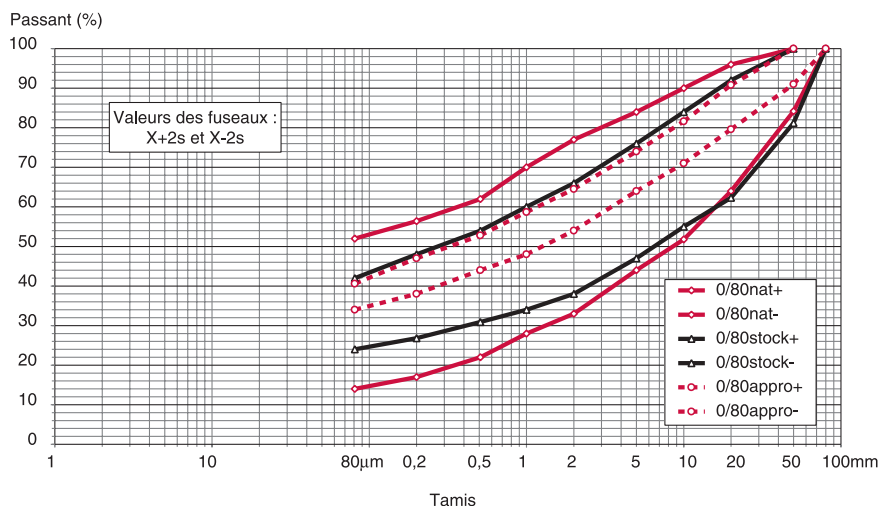


Fig. 4 - Fuseaux granulométriques des matériaux. Résultats obtenus à différents stades de leur préparation.

puis transportés par un tapis au-dessus d'un crible vibrant à mailles carrées (□ 90 mm) (fig. 5 et 6).

Le produit obtenu, totalement écrêté et pulvérisé, peut s'identifier à une grave limoneuse de classe granulaire 0/80 millimètres.

Il faut noter le rendement relativement faible de ce dispositif (60 mètres cubes par heure).



Fig. 5 - Crible à deux niveaux (barreaux + tamis □).



Fig. 6 - Tamis vibrant (mailles de 90 millimètres).

### ■ Crible à barreaux « Simbagrid 3900 »

Ce matériel robuste comporte uniquement une grille à barreaux horizontale (écartement de 110 mm) avec basculement dans le plan vertical de celle-ci à la fin de chaque cycle de criblage. Le déclenchement est initié par la chargeuse lors de son recul (fig. 7 et 8).

À partir de cette technique, le matériau élaboré présente une granularité sensiblement plus grossière (0/120 mm). Si l'installation du poste de criblage est optimisée, il est possible d'obtenir une production de l'ordre de 120 mètres cubes par heure.

Les matériaux ainsi préparés et criblés ont été mis en stocks provisoires (hauteur maximale de l'ordre de 6 m), constitués par couches élémen-



Fig. 7 - Crible à barreaux « Simbagrid 3900 » (écartement de 110 millimètres).



Fig. 8 - Basculement vertical de la grille.

taires de 80 cm d'épaisseur, faiblement compactées. Ces dispositions ont été retenues afin de limiter les gradients de densité et donc de perméabilité à l'intérieur des stocks. Seul le sommet des dépôts a fait l'objet d'un compactage énergétique, accompagné d'un réglage soigné à la niveleuse avec création de pentes transversales (5 %) (fig 9 et 10).

Un suivi granulométrique post-criblage a été effectué en distinguant les deux productions (fig. 11) :

- > stock 1 : matériau 0/80 mm (vingt-six granulométries) constitué courant août 1988,
- > stock 2 : matériau 0/120 mm (quatorze granulométries) constitué courant septembre 1988.

L'analyse des résultats de ces essais d'identification montre :

- > une différence assez peu marquée entre les deux fabrications (si l'on exclut l'écart entre les D),
- > comparé à celui du matériau brut (0/80 nat), un resserrement notable du fuseau granulométrique.



Fig. 9 - Mise en stock des matériaux criblés par couche de 80 cm d'épaisseur.



Fig. 10 - Stockage provisoire des matériaux criblés.

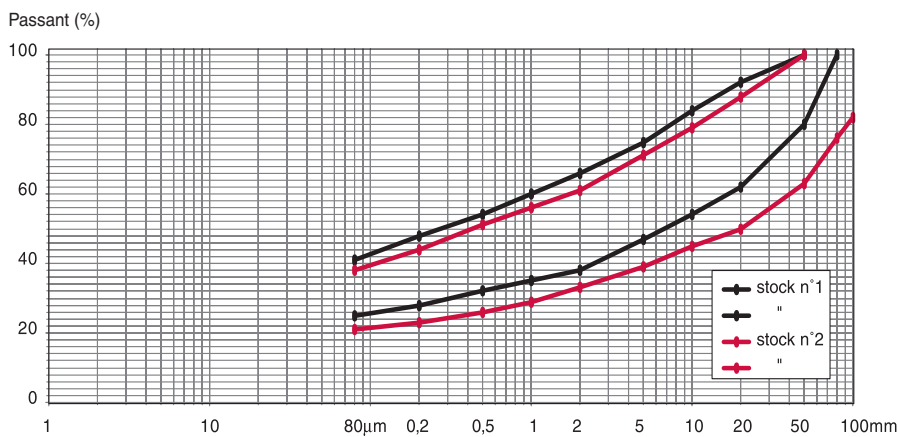


Fig. 11 - Fuseaux granulométriques des matériaux post-criblés (stocks 1 et 2).

*Sol repris sur stock frontalement et étalé sur le lieu de mise en œuvre (0/80 appro)*

Après neuf mois de stockage (dont l'hiver 1988-1989), les matériaux ont été repris frontalement au moyen d'une pelle mécanique équipée « en rétro », par couches de 2,50 m d'épaisseur (fig. 12).

Transportés par camion, déversés en tas plus ou moins étalés, ils sont ensuite régalez à l'aide d'un bouteur léger à leur emplacement définitif.



Fig. 12 - Reprise frontale « en rétro » des matériaux.

À ce stade d'élaboration final, de nouvelles analyses granulométriques ont été réalisées afin de vérifier la dispersion granulaire effective des matériaux avant leur traitement en place.

Ces derniers essais (quatorze unités) ont révélé un nouvel et important resserrement du fuseau granulométrique (cf. fig. 4).

Il y a lieu de noter qu'un tel résultat a pu être obtenu sans pré-traitement à la chaux et ce, malgré le taux élevé de fines (% moyen = 38), du fait :

- du caractère nettement limoneux de la moraine ( $V_{BS} < 0,4$ ),
- de son état de consolidation naturel incompatible avec des teneurs en eau de saturation élevées (état hydrique moyen après ameublissement),
- de l'éclatement des éléments constituant la matrice du matériau et conférant à celui-ci un comportement voisin d'un sol pulvérulent.

#### Remarque

*Au vu des résultats du suivi granulométrique des matériaux, il apparaît que la phase la plus efficace vis-à-vis de l'homogénéisation granulaire correspond à la reprise sur stock provisoire.*

*Le fait de réaliser cette opération « en rétro » à la pelle mécanique semble favorable à l'obtention d'un mélange uniforme. Une reprise en butte, au chargeur, avec éboulements périodiques du front d'attaque, n'aboutirait probablement pas à un résultat identique. En effet, dans le cas de sols grossiers à faible cohésion, une ségrégation inévitable se produit lors de la chute des matériaux ... phénomène bien difficile à corriger par la suite.*

#### **Effet sur l'état hydrique**

En parallèle avec le suivi granulométrique exposé précédemment, nous avons vérifié l'évolution de l'état hydrique des matériaux aux différents stades de leur préparation.

Comme déjà indiqué, à l'état naturel, les alluvions glaciaires surconsolidées présentent un taux d'humidité relativement modéré. Par ailleurs, au cours de l'extraction, les sols très humides en contact avec les circulations d'eau internes ont été éliminés.

Le tableau I présente le résultat des mesures de teneur en eau déterminées sur la fraction 0/20 mm du matériau.

On observe que :

➤ sur un cycle saisonnier, les teneurs en eau moyennes en place relevées sur une profondeur d'une dizaine de mètres peuvent varier de plus de deux points (de 11,2 à 8,9 %),

➤ les matériaux préparés durant le mois d'août présentent, à leur mise en stock, une teneur en eau moyenne inférieure d'un point par rapport à ceux criblés courant septembre 1988 ( $w_{\text{moy}} = 7,4\%$  en août et 8,6 % en septembre) ;

➤ après neuf mois de stockage comprenant l'hiver 1988-1989, on constate une certaine uniformisation des teneurs en eau au sein des dépôts provisoires (teneur en eau d'équilibre voisine de 8 %),

➤ au cours de la phase de reprise et d'approvisionnement survenue de juin à juillet 1989 (période particulièrement chaude), un assèchement significatif des matériaux glaciaires a été constaté ( $5,6 < W < 7,5\%$ ).

En ce qui concerne la dispersion des mesures, on relève un coefficient de variation de l'ordre de 20 % avant extraction. Malgré la préparation réalisée, il semble peu probable de ramener de manière courante cette valeur en-dessous de 10 %, après mise en œuvre.

#### **Nota**

*Lors de l'ajustement de la teneur en eau au cours du traitement, la plage des valeurs de cette dernière peut être considérablement augmentée du fait de la difficulté de répartir uniformément, en surface, une grande quantité d'eau avec les matériels actuels (apport > 20 l/m<sup>2</sup>) (fig. 13).*

TABLEAU I  
Évolution des valeurs de teneur en eau

Localisation et phases		Nombre de mesures (n)	Moyenne (%)	Écart-type (%)	Coefficient de variation (%)
Mesures en place (sondages)	Printemps et fin automne 1984	32	11,2	2,2	20
	Étés 1987 et 1988	27	8,9	1,8	20
Mesures après criblage	Stock 1 Août 1988	26	7,4	1,0	14
	Stock 2 Septembre 1988	14	8,6	1,2	14
Mesures au stock après hiver 1988/1989	Stock 1	40	8,0	0,9	11
	Stock 2	23	7,7	0,7	9
Mesures sur site de mise en œuvre (avant arrosage et traitement) Été 1989	Zone 1 5/6/89	8	7,2	0,9	13
	Zone 2 13/6/89	8	7,5	0,3	4
	Zone 3 19/6/89	8	6,3	0,7	11
	Zone 4 4/7/89	9	5,6	0,8	14



Fig. 13 - Apport et concentration localisés de l'eau.

### Détermination du niveau d'homogénéité

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) [1] prévoit de classer les couches de forme en fonction de leur homogénéité granulaire appréciée à partir de la mesure de  $\rho_{dOPN}$  déduite de l'essai Proctor normal.

Dans le cadre du suivi de ce chantier, sept essais Proctor normal ont été réalisés sur le matériau naturel prélevé en fin d'élaboration (tableau II).

Au sens 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) [1], ces matériaux peuvent être qualifiés d'homogènes pour un emploi en couche de forme (dispersion de  $\rho_{dOPN} \leq 6\%$ ).

### Analyse technico-économique

Une étude comparative de coûts (entre les options « couche de forme granulaire » et « couche de forme traitée ») établie en fin de chantier à partir de prix actualisés fait apparaître les résultats suivants.

#### Couche de forme traitée (option retenue)

■ **Prix hors taxe d'un mètre cube de matériau traité (plus-value au prix de déblai)**

➤ préparation du matériau	36,08 F
➤ traitement en place toutes sujétions incluses	72,06 F
➤ ciment Portland CPJ/CEM II/B 32,5 (100 kg/m <sup>3</sup> )	50,27 F
➤ Total	158,41 F

#### ■ Prix hors taxe d'un mètre carré de couche de forme traitée de 30 cm d'épaisseur

➤ matériau traité (158,41 × 0,30)	47,52 F
➤ enduit de protection avec cloutage	12,93 F
➤ Total	60,45 F

#### Couche de forme granulaire (provenance extérieure)

#### ■ Prix hors taxe d'un mètre carré de couche de forme traitée de 50 cm d'épaisseur

➤ grave sableuse 0/80 mm (livrée et mise en place)	58,16 F
➤ évacuation de 0,500 m <sup>3</sup> de déblai	3,12 F
➤ Total	61,28 F

#### Remarque

*Les deux solutions techniques admises a priori comme équivalentes sur le plan comportemental (classe de plate-forme visée PF<sub>2</sub>) sont d'un coût relativement voisin. Mais, dans un contexte privilégiant l'exploitation optimale des matériaux du site, la technique « couche de forme traitée » a été logiquement retenue par le maître d'œuvre.*

### Conclusion

Les alluvions glaciaires surconsolidées et blocailleuses constituent d'excellents matériaux pour couche de forme sous réserve d'avoir subi une préparation adaptée, à savoir :

- localisation et sélection des alluvions limono-graveleuses les plus aptes à un traitement en place,
- écrêtage de ces derniers à 120 mm (limite admissible liée au malaxage),
- déstructuration et homogénéisation des matériaux sélectionnés, aux différents stades d'élaboration (extraction, criblage, stockage, reprise frontale et régilage sur le lieu d'utilisation).

TABLEAU II  
Résultat des essais Proctor sur sol naturel

N°	1	2	3	4	5	6	7	$\bar{X}$
W <sub>OPN</sub> (%)	8,3	8,2	7,5	8,0	7,2	6,2	7,5	7,6
$\rho_{dOPN}$ (t.m <sup>-3</sup> )	2,064	2,070	2,100	2,110	2,170	2,150	2,130	2,113
Étendue des mesures de $\rho_{dOPN}$ : 0,106 t.m <sup>-3</sup> . Dispersion relevée : (0,106/2,113) × 100 = 5 %.								

Les modes et techniques d'exécution retenus dans le cas exposé ont permis d'obtenir la qualité requise pour ce type d'application.

Une analyse comparative succincte montre une équivalence de coût entre les techniques « couche

de forme granulaire » et « couche de forme traitée ». Cependant, la volonté du concepteur de privilégier la réutilisation des déblais a conduit à adopter, pour le projet concerné, cette dernière possibilité.

---

#### RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

---

- [1] 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.

#### ABSTRACT

##### **An application of a technique for treating a deposit by homogenization in order to create a capping layer**

J. BIMBARD

This paper shows that a natural silty-clayey material which is extremely coarse (0/300 mm with erratic blocks) whose homogeneity is low (variable nature and hydric state) can, after suitable preparation and treatment, provide an effective capping layer. After a characterization of the geotechnical formation in question, this paper shows the gradual improvement undergone by the materials during the different phases of construction (selection, extraction, screening, stockpiling, resumption, etc.) which lead, ultimately, to a product which can be treated in-situ extremely effectively with standard techniques.

To conclude, in the present-day situation, the additional cost associated with preparation does not prove to be prohibitive.