

Réutilisation d'argiles très plastiques en corps de remblais routiers : expérimentations sur le chantier de l'Autoroute A34 (Charleville-Réthel)

Véronique BERCHE*
Patrice JEANJEAN

Laboratoire régional des ponts et chaussées,
Saint-Quentin, France

Pascal ROSSIGNY

Direction départementale de l'équipement
des Ardennes, Charleville-Mézières, France

Valéry FERBER

Laboratoire central des ponts et chaussées,
Bouguenais, France

Alain QUIBEL

Centre d'expérimentation routière de Rouen,
Le Grand Quevilly, France

■ RÉSUMÉ

Cet article décrit la réalisation de remblais expérimentaux par le réemploi des argiles très plastiques en remblai. Dans un premier temps, une présentation des résultats des études géotechniques effectuées sur les différents matériaux plastiques rencontrés sur l'aire d'étude sera effectuée. Puis, le programme du chantier expérimental et les résultats obtenus seront exposés et discutés ; les résultats de suivi dans le temps de ces remblais ont fait l'objet d'un rapport de recherche et ne seront pas présentés dans ce document. Enfin, des suggestions de méthodologie d'étude et de conditions de réutilisation seront proposées pour les sols A4.

Reuse of highly plastic clays in road embankment structures: Experimental campaigns on the A34 motorway project (Charleville-Réthel)

■ ABSTRACT

This article describes the fabrication of experimental embankments through the reuse of highly plastic clays already found in embankment settings. The first part presents results from geotechnical investigations conducted on the various plastic materials encountered within the study zone. The experimental project schedule and results derived are provided next, accompanied by a discussion. The findings from a monitoring campaign on these embankments over time have given rise to a research report and will not be included in this document. The article closes with a series of suggestions proposed for A4-type soils regarding both study methodology and reuse conditions.

* AUTEUR À CONTACTER :

Véronique BERCHE

veronique.berche@developpement-durable.gouv.fr

INTRODUCTION

Les études géologiques et géotechniques préliminaires menées dans le cadre du projet de l'autoroute A34, section Faissault/Bertoncourt (dix kilomètres entre Reims et Charleville en tracé neuf), ont mis en évidence la présence, en quantité importante, d'argiles très plastiques (classe A4 selon la norme NF P 11 300), non réutilisables selon le guide de réutilisation des matériaux en remblais et couche de forme [1]. Un second projet (au stade études préliminaires) concernant la branche Ouest du Y Ardennais (section d'une trentaine de kilomètres entre La Francheville et Rocroi) devant recouper sur au moins un tiers de sa longueur des argiles plastiques, l'étude du réemploi de ces matériaux en remblai devenait un enjeu majeur pour le projet.

Des études complémentaires ont donc été effectuées par le LRPC de Saint-Quentin pour examiner la possibilité de réutiliser une partie des argiles A4 rencontrées. Suite à ces études, le maître d'œuvre (DDE des Ardennes, actuellement DIR Nord) a fait réaliser des remblais expérimentaux pour évaluer les possibilités de réemploi de ces matériaux dans des conditions de chantier et pour observer le comportement à long terme de ces matériaux une fois traités. Des expérimentations

similaires avaient été réalisées il y a quelques décennies pour des applications en corps de remblai [2] et même en couche de forme [3, 4]. Elles avaient ouvert des perspectives assez optimistes. Cet article présente les résultats de ces études en laboratoire et sur chantier et en tire quelques conclusions pratiques sur les modalités d'utilisation des argiles très plastiques traitées.

ÉTUDE DE LABORATOIRE

La section concernée par les futurs travaux de l'A34 se situant entre Rethel et Faissault, il a été décidé d'intensifier les reconnaissances dans les secteurs recoupant les formations de l'Albien et notamment les argiles du Gault (Albien moyen). Ce sont des argiles de teinte gris verdâtre reposant sur des sables plus ou moins argileux ou glauconieux de l'Albien inférieur.

Pour identifier et décrire le comportement des sols plastiques, vingt sondages ont été réalisés au moyen d'une tarière Highway (diamètre : 500 mm), jusqu'à 6 mètres de profondeur. Ces matériaux ont fait l'objet d'une étude de traitement à la chaux pour un réemploi en corps de remblai [5].

■ Identification des matériaux

Les matériaux rencontrés ont pu être regroupés en quatre familles, caractérisées par leur aspect visuel :

- les matériaux de surface, argiles plastiques vertes, éventuellement sableuses ;
- les argiles plastiques vertes à panachées (par souci de simplification, on les dénommera ultérieurement « argiles vertes ») ;
- les argiles marneuses noires à vert foncé (par souci de simplification, on les dénommera ultérieurement « argiles marneuses noires ») ;
- les sables argileux.

Ne faisant pas l'objet de cette étude, aucun essai d'identification n'a été effectué sur les matériaux de surface et les sables argileux.

Les mesures des paramètres d'identification des argiles plastiques vertes et des argiles marneuses noires sont synthétisées dans le **tableau 1**.

Les analyses minéralogiques réalisées sur les argiles marneuses noires indiquent une forte concentration en smectites (de l'ordre de 60 %). La plasticité et l'état hydrique de ces matériaux conduiraient à des difficultés de mises en œuvre (circulation de chantier, traitement...) sans s'affranchir des problèmes de gonflement. Il a donc été décidé de se concentrer sur la réutilisation des argiles plastiques vertes en corps de remblai.

Des essais Proctor, avant et après traitement à la chaux ont été réalisés sur les argiles vertes et sur les argiles marneuses noires. Pour la réalisation de ces essais, les matériaux prélevés et traités ont été malaxés jusqu'à obtenir une mouture de 0/5 mm de façon à avoir une répartition et une action optimale de la chaux. À ce stade de l'étude, seul le traitement à la chaux a été évalué. De plus, aucun traitement supérieur à 3 % de chaux n'a été testé, le recours à des emprunts de matériaux locaux ayant été considéré comme moins onéreux que le traitement au-delà de ce dosage.

tableau 1
Identification des deux familles d'argiles.

	Argiles plastiques vertes	Argiles marneuses noires
Limite de liquidité	de 71 à 98 % (Moyenne : 81,7 %)	de 85 à 121 % (Moyenne : 100,8 %)
Indice de plasticité	De 44 à 59 (Moyenne : 49,6)	de 60 à 77 (Moyenne : 69)
Passant à 80 µm	de 70,3 à 99,2 % (Moyenne : 90,5 %)	de 67,3 à 99,7 % (Moyenne : 96,4 %)
Teneur en eau naturelle	de 25 à 39 % (Moyenne : 33,2 %)	de 32 à 45 % (Moyenne : 38,2 %)

› Étude de traitement des argiles plastiques vertes

Ces matériaux sont caractérisés par des indices de plasticité compris entre 42 et 59 (13 échantillons, classification : A4-) et une teneur en eau moyenne de 33,2 %.

À l'état naturel, la teneur en eau à l'optimum Proctor normal (OPN) est de 23 % pour une masse volumique sèche à l'OPN de 1,61 t/m³ (figure 1). Les mesures d'indice portant immédiat (IPI) indiquent que la portance de ce matériau peut être considérée comme satisfaisante (IPI > 5) jusqu'à 27 % de teneur en eau naturelle.

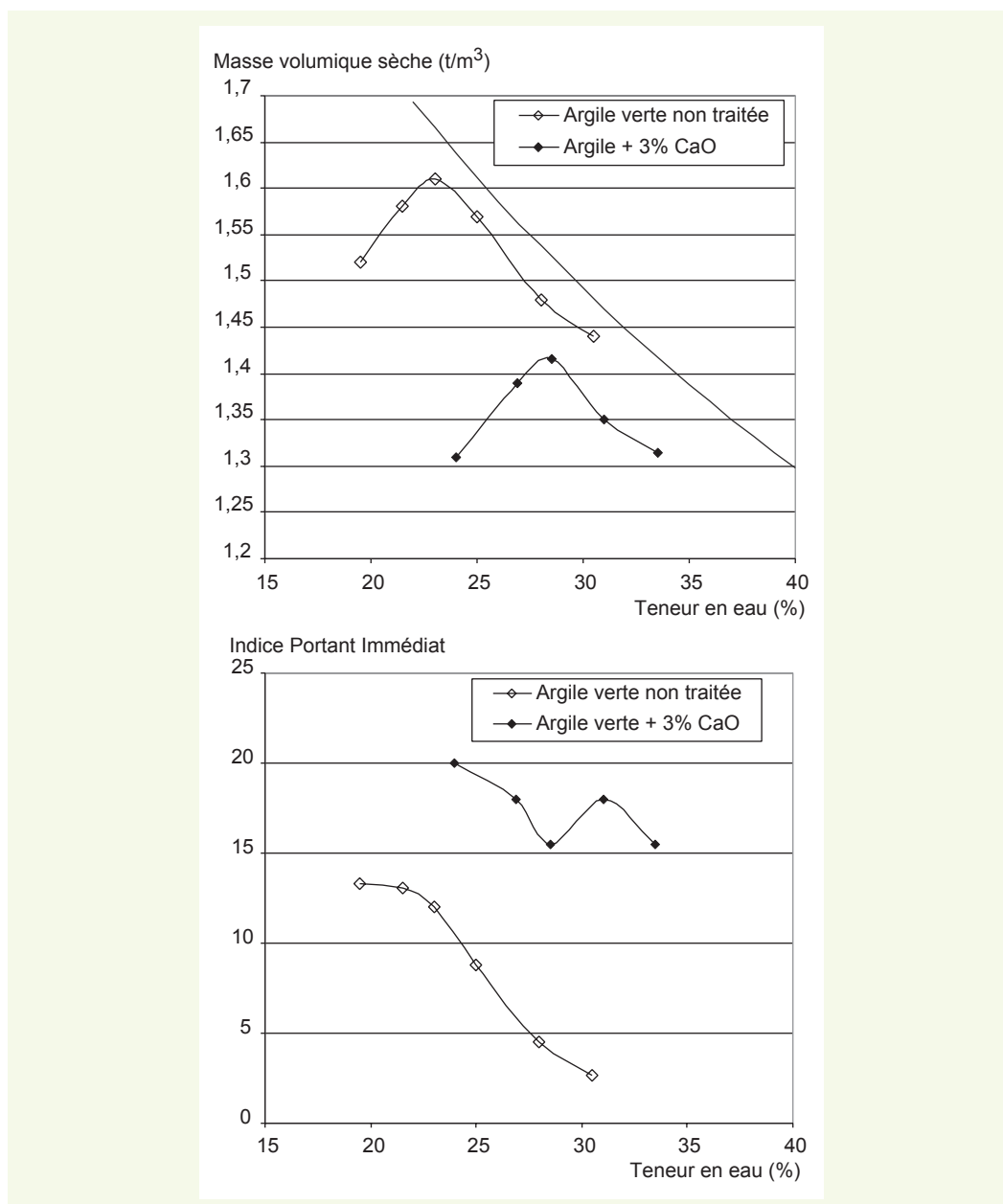
Une étude Proctor normal avec mesure d'IPI a été réalisée sur ce matériau, traité à 3 % de chaux. On constate que, pour ce dosage en chaux, la teneur en eau à l'OPN, avant traitement, est de 32,8 % pour une masse volumique sèche de 1,41 t/m³. La portance de ces matériaux, après traitement, peut être considérée comme satisfaisante (IPI > 5) jusqu'à 39 % de teneur en eau initiale.

› Étude de traitement des argiles marneuses noires

Ces matériaux sont caractérisés par des indices de plasticité compris entre 60 et 77 (41 échantillons, classification : A4+) et une teneur en eau moyenne de 38,2 %.

figure 1

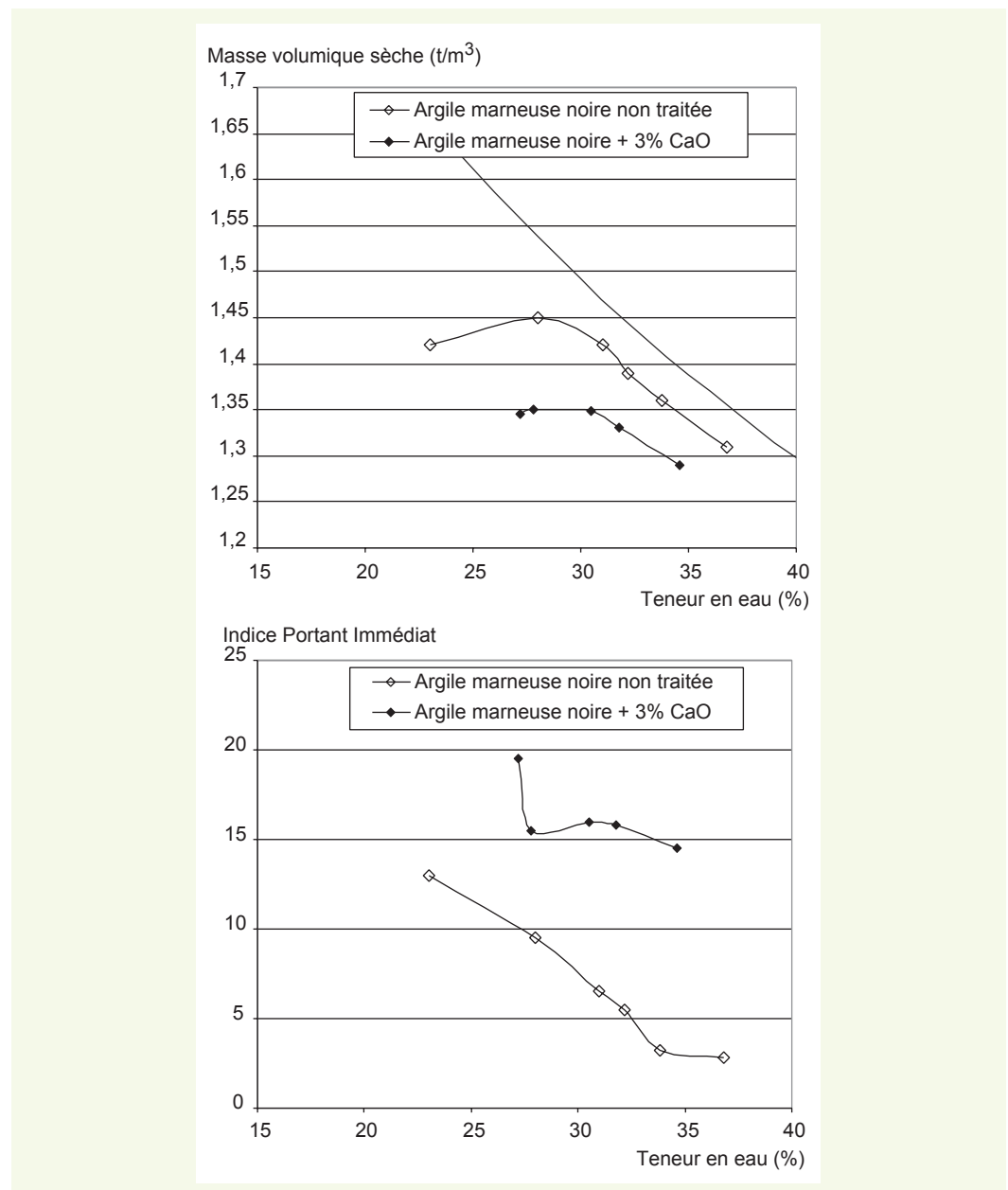
Courbes Proctor – IPI des argiles plastiques vertes, avant et après traitement à 3 % de chaux.



À l'état naturel, la teneur en eau à l'optimum Proctor normal est de 28,5 % pour une masse volumique sèche à l'OPN de 1,45 t/m³ (figure 2). Les mesures d'indice portant immédiat (IPI) indiquent que la portance de ce matériau peut être considérée comme satisfaisante (IPI > 5) jusqu'à 32 % de teneur en eau naturelle.

Une étude Proctor normal avec mesure d'IPI a été réalisée sur ce matériau traité à 3 % de chaux. On constate que, pour ce pourcentage de chaux, la teneur en eau de l'optimum Proctor avant traitement est de 32,5 %, pour une masse volumique sèche de 1,36 t/m³. La portance de ces matériaux, après traitement, peut être considérée comme satisfaisante (IPI > 5) jusqu'à 40 % de teneur en eau initiale. La teneur en eau naturelle maximale mesurée étant de 45 %, une partie de ces matériaux risque de poser des difficultés de traficabilité et de réemploi, même après un traitement à 3 % de chaux.

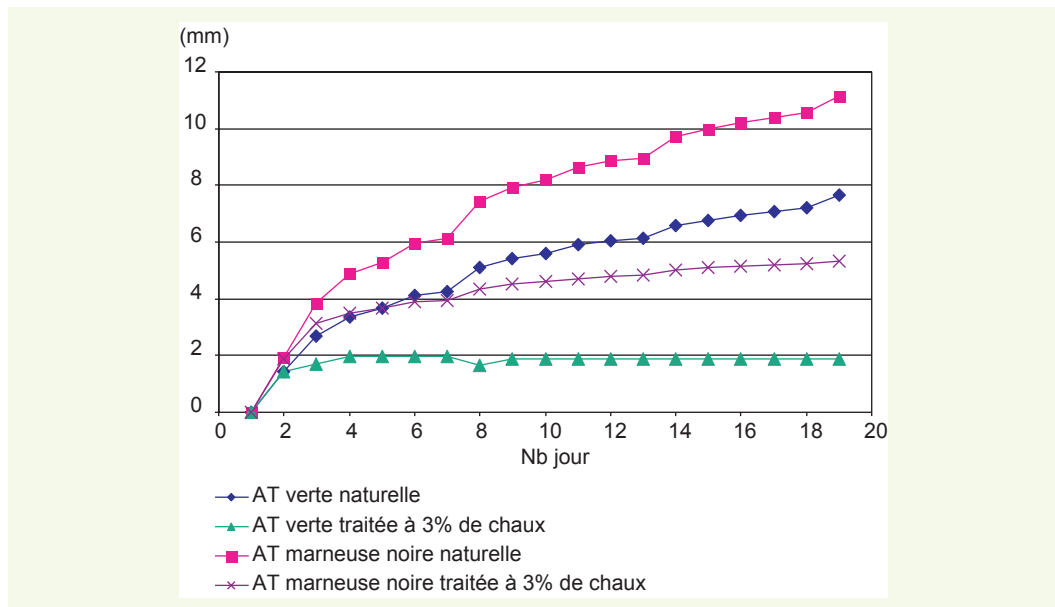
figure 2
Courbes Proctor – IPI des argiles marneuses noires, avant et après traitement à 3 % de chaux.



■ Gonflement CBR

Sur les éprouvettes réalisées pour les études de traitement, des mesures de gonflement en moules CBR ont été effectuées sur les deux types d'argiles (argiles vertes et argiles marneuses noires), avant et après traitement à la chaux (figure 3). La mesure de gonflement a été réalisée après une immersion de trois semaines, cette durée ayant été choisie pour améliorer la saturation des échantillons.

figure 3
Résultats des essais de gonflement CBR sur les deux familles d'argiles A4.



On constate que :

- les matériaux gonflent « instantanément » qu'ils soient traités ou non traités ;
- les matériaux non traités continuent de gonfler même après trois semaines à l'immersion ;
- les argiles plastiques vertes gonflent moins à l'état naturel (gonflement CBR de l'ordre de 8 mm après 23 jours, soit plus de 5 % de déformation) que les argiles marneuses noires (gonflement CBR de l'ordre de 11 mm après 23 jours, soit 7 % de déformation) ;
- les argiles plastiques vertes traitées à 3 % de chaux ne gonflent pratiquement plus après trois jours d'imbibition (gonflement CBR inférieur à 2 mm après 23 jours, soit moins de 1,5 % de déformation) ;
- les argiles marneuses noires traitées à 3 % de chaux continuent de gonfler après trois semaines d'immersion (gonflement CBR supérieur à 5 mm après 23 jours, soit plus de 3 % de déformation).

Pour les argiles vertes, les teneurs en eau après trois semaines à l'immersion sont de 29,3 % à l'état naturel (pour une teneur en eau initiale de 28 %) et de 35,1 % après traitement (pour une teneur en eau initiale de 33 %).

Pour les argiles marneuses noires, les teneurs en eau après trois semaines à l'immersion des matériaux sont de 38 % à l'état naturel (pour une teneur en eau initiale de 28,5 %) et de 37,8 % après traitement (pour une teneur en eau initiale de 32,7 %).

Au vu de ces premiers résultats, il avait été recommandé de tester la réutilisation des argiles vertes (A4-) sur des remblais expérimentaux moyennant un traitement à 3 % de chaux et après un malaxage permettant d'obtenir une granulométrie fine (de l'ordre de 0/20 mm).

Pour les argiles noires (A4+), le gonflement étant persistant même traitées à 3 % de chaux, la réutilisation n'a pas été envisagée.

CHANTIER EXPÉRIMENTAL

Pour évaluer la faisabilité en vraie grandeur du réemploi des argiles plastiques vertes traitées à la chaux, il a été décidé de réaliser deux remblais expérimentaux. Après avoir présenté les détails de cette expérimentation, les résultats des essais *in situ* réalisés sur ces remblais seront exposés.

■ Programme expérimental

Le chantier expérimental avait pour objectif d'étudier l'influence du dosage en chaux et des modalités de compactage sur les masses volumiques sèches et la portance des remblais. Aussi, les paramètres retenus pour la réalisation de ces remblais sont :

- deux dosages en chaux de 2 et 3 % ;
- deux énergies de compactage (moyenne et intense) définies d’après les tableaux de compactage des sols A3 (**figure 4**) ;
- deux types de compacteurs, avec ou sans pieds dameurs (VP5 et V5 selon classification du guide de réalisation des remblais et des couches de forme [1]).

De plus, une couche de forme en argile verte traitée à 3 % de chaux et 7 % de liant a été réalisée sur le remblai traité à 3 % de chaux.

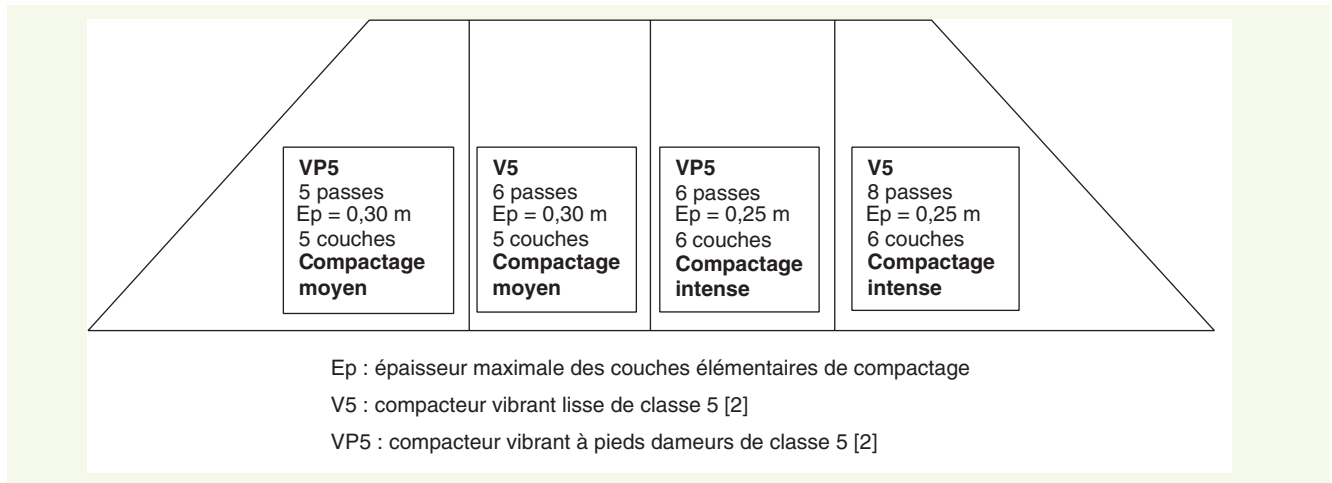


figure 4

Schéma des modalités de traitement et de compactage pour un dosage en chaux (2 % ou 3 %).

Un remblai expérimental a été réalisé pour chaque dosage en chaux, selon la géométrie suivante :

- longueur : 100 mètres ;
- largeur : 10 mètres, divisée en quatre bandes permettant de tester deux compacteurs et deux énergies de compactage pour chaque dosage ;
- hauteur : 1,5 mètre, pour représenter la Partie Supérieure des Terrassements et la couche de forme.

Le compactage pour chaque remblai a été réalisé selon le schéma de la **figure 4**.

Concernant la procédure de traitement, il a été retenu de traiter les argiles vertes à 1 % au déblai ; puis de finaliser le traitement en remblai par un ajout de 1 ou 2 points de chaux selon le dosage final (respectivement pour 2 et 3 % de dosage final). Le malaxage au déblai et en remblai a été réalisé au pulvérisateur de sol.

Deux agents du Laboratoire de Saint-Quentin ont été détachés pour suivre en continu le traitement à l’extraction, le stockage provisoire, la réalisation et la finition des remblais.

Avant travaux, des prélèvements ont été effectués de façon à définir les paramètres du compactage, notamment les données à l’OPN et les valeurs IPI sur le matériau réellement utilisé sur le chantier. Les résultats de ces essais sont les suivants :

- matériau naturel $\rho_{d\text{OPN}} = 1,5 \text{ t/m}^3$, $W_{\text{OPN}} = 24 \%$;
- matériau traité à 2 % de chaux : $\rho_{d\text{OPN}} = 1,37 \text{ t/m}^3$, $W_{\text{OPN}} = 25 \%$ (avant traitement) ;
- matériau traité à 3 % de chaux : $\rho_{d\text{OPN}} = 1,38 \text{ t/m}^3$, $W_{\text{OPN}} = 31 \%$ (avant traitement).

La réalisation du chantier expérimental s’est déroulée du 16 juin au 4 juillet 2003.

■ Réalisation du chantier

Avant de construire les remblais expérimentaux, un fond de forme a été réalisé sur le sol support (**figure 5**), recouvert par un géotextile (**figure 6**) puis une base drainante (**figure 7**). Cette couche est destinée avant tout à assurer une portance minimale pour pouvoir compacter correctement le



figure 5
Réalisation du fond
de forme.

figure 6
Pose du géotextile.

figure 7
Apport de la base
drainante.

figure 8
Réception à la
dynaplaque.

5 6
7 8

matériau sur le fond de couche. Elle est constituée de matériau 0/300 mm mis en œuvre sur 70 cm d'épaisseur.

Des essais à la dynaplaque ont permis d'évaluer l'hétérogénéité de portance de ce support :

- portance sur « géotextile » : toutes les valeurs inférieures à 20 MPa ;
- portance sur « base drainante » (**figure 8**) : de 40 à 70 MPa (moyenne = 49,5 MPa).

Le matériau a été traité au déblai et extrait à la décapeuse (**figure 9**) puis traité en seconde phase en remblai (**figures 10, 11 et 12**). Le traitement en remblai a été réalisé par épandage en une passe et malaxage en deux passes de pulvérisateur de sol, dans des conditions météorologiques favorables. Ceci a permis d'obtenir une mouture tout à fait satisfaisante, de l'ordre de 0/20 mm (**figure 13**). Selon la modalité, le compactage a été réalisé au moyen d'un compacteur vibrant lisse (classe V5) et d'un compacteur vibrant à pieds dameurs (**figure 14**, classe VP5). Enfin, le mètre excédentaire a été éliminé au moment du talutage final (**figure 15**) et les plates-formes ont été protégées par un enduit de cure gravillonné.

■ Mesures de portance sur l'argile verte traitée à la chaux

Les portances ont été mesurées à la dynaplaque par le LRPC de Saint-Quentin au fur et à mesure de la réalisation des remblais. De plus, des mesures ont été réalisées sur la plate-forme 22 et 105 jours plus tard pour observer l'évolution de la portance à moyen terme.



figure 9
Extraction et traitement au déblai.

figure 10
Apport du matériau traité.

figure 11
Régalage et épandage de la chaux.

figure 12
Malaxage.

figure 13
Mouture après traitement en remblai.

figure 14
Compactage du remblai.

figure 15
Finition des remblais.

9	10
11	12
13	14
15	

► Portances à court terme

Les résultats des mesures de portance sont présentés sur les figures 16 et 17, respectivement pour un dosage de 2 et 3 % de chaux. Sur chaque graphique est reportée la valeur moyenne de portance en fonction de la hauteur dans le remblai, assortie d'un écart-type calculé à partir de cinq mesures. Chaque graphique correspond à un type de compacteur et permet d'apprécier l'influence de l'énergie de compactage sur la portance.

figure 16

Mesures de portance à court terme sur l'argile verte traitée à 2 % de chaux, et pour les différentes modalités de compactage.

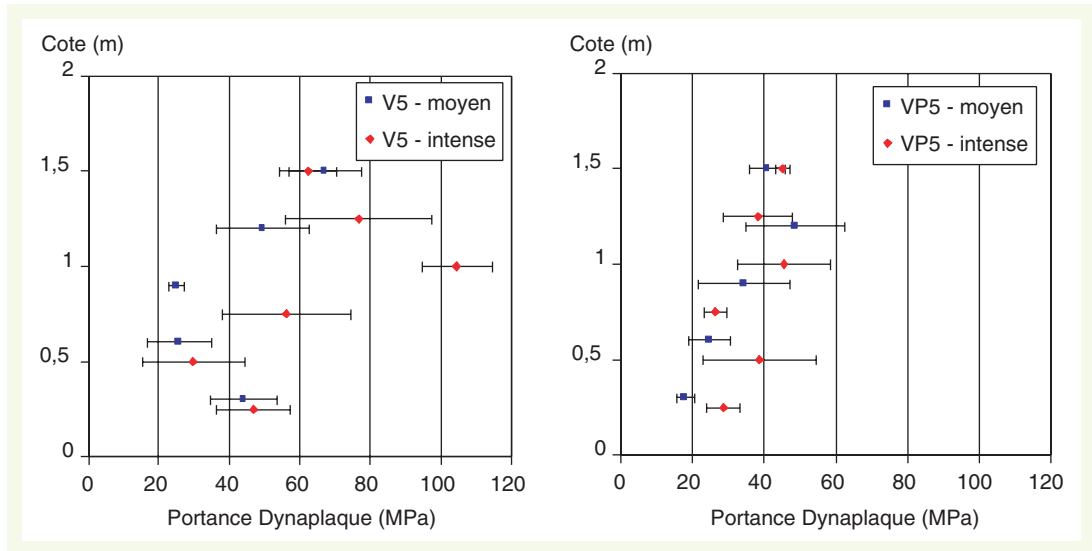
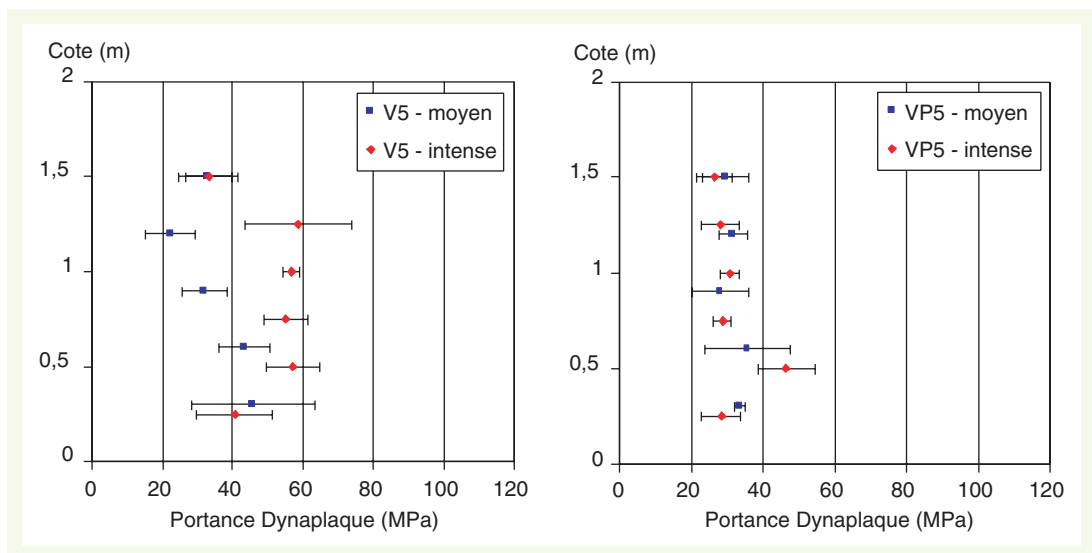


figure 17

Mesures de portance à court terme sur l'argile verte traitée à 3 % de chaux, et pour les différentes modalités de compactage.



On peut constater que la portance ne varie pas clairement en fonction de la hauteur dans le remblai mais la portance moyenne sur l'ensemble des couches varie en fonction du type de compacteur et du dosage en chaux. On observe ainsi que :

- à 2 % de chaux et un compactage moyen, la portance moyenne est de 42 MPa avec un compacteur V5 (écart-type : 19 MPa) et de seulement 33 MPa avec un compacteur VP5 (écart-type : 14 MPa) ;
- à 2 % de chaux et un compactage intense, la portance moyenne est de 66 MPa avec un compacteur V5 (écart-type : 29 MPa) et de seulement 39 MPa avec un compacteur VP5 (écart-type : 13 MPa) ;

- à 3 % de chaux et un compactage moyen, la portance moyenne est de 35 MPa avec un compacteur V5 (écart-type : 13 MPa) et de seulement 32 MPa avec un compacteur VP5 (écart-type : 8 MPa) ;
- à 3 % de chaux et un compactage intense, la portance moyenne est de 52 MPa avec un compacteur V5 (écart-type : 13 MPa) et de seulement 32 MPa avec un compacteur VP5 (écart-type : 9 MPa).

Ainsi, il apparaît que la meilleure portance est obtenue pour un compactage intense au compacteur vibrant lisse avec un dosage en chaux de 2 %. Dans ces conditions, on obtient une portance supérieure à 50 MPa, c'est-à-dire une classe d'arase AR2 [1], pour plus de 83 % de mesures réalisées. L'objectif de 50 MPa n'est pas atteint par un compactage intense au compacteur à pieds dameurs. De plus, les résultats obtenus avec le compacteur à pieds dameurs sont peu sensibles à l'énergie de compactage, quel que soit le dosage en chaux. En revanche, cette énergie permet d'améliorer la portance avec le compacteur vibrant lisse. Pour expliquer cette apparente inefficacité du compacteur à pieds dameurs, il faut rappeler que :

- l'énergie intense pour un sol de classe A₃ compacté au VP5 est obtenue par six passes de compacteur au lieu de huit passes pour le compacteur V5 [1] ;
- l'irrégularité de surface due aux pieds dameurs pourrait expliquer, en partie, les résultats plus faibles obtenus avec le compacteur VP5.

Une autre information importante résultant de ces mesures est que l'augmentation de dosage en chaux ne semble pas améliorer la portance à court terme et conduirait plutôt, au contraire, à sa réduction. Ceci pourrait résulter du fait que la variation de dosage, de la même manière qu'une variation de plasticité, modifie les propriétés du matériau et, par conséquent, son comportement au compactage. De ce fait, une énergie de compactage plus importante serait nécessaire pour un dosage plus élevé.

› Portances à moyen terme

Les portances mesurées à 22 et 105 jours sur les deux remblais permettent de suivre l'évolution du comportement de l'arase à moyen terme (figures 18 et 19). On constate que le dosage en chaux a une forte influence sur le comportement à moyen terme. En effet :

- à 2 % de chaux (figure 18), la portance n'augmente pas systématiquement au bout de 22 jours, et on observe sa diminution progressive entre 22 et 105 jours ;
 - à 3 % de chaux (figure 19), la portance augmente systématiquement au bout de 22 jours et, entre 22 et 105 jours, soit elle augmente (VP5 compactage moyen), soit elle ne diminue que légèrement.
- Ainsi, le traitement à 2 % de chaux de ces argiles très plastiques ne conduit pas à une augmentation de portance à moyen terme. Il apparaît que, par la suite, les bénéfices tirés de la prise

figure 18
Évolution de la portance en arase du remblai traité à 2 % de chaux lors des 105 premiers jours.

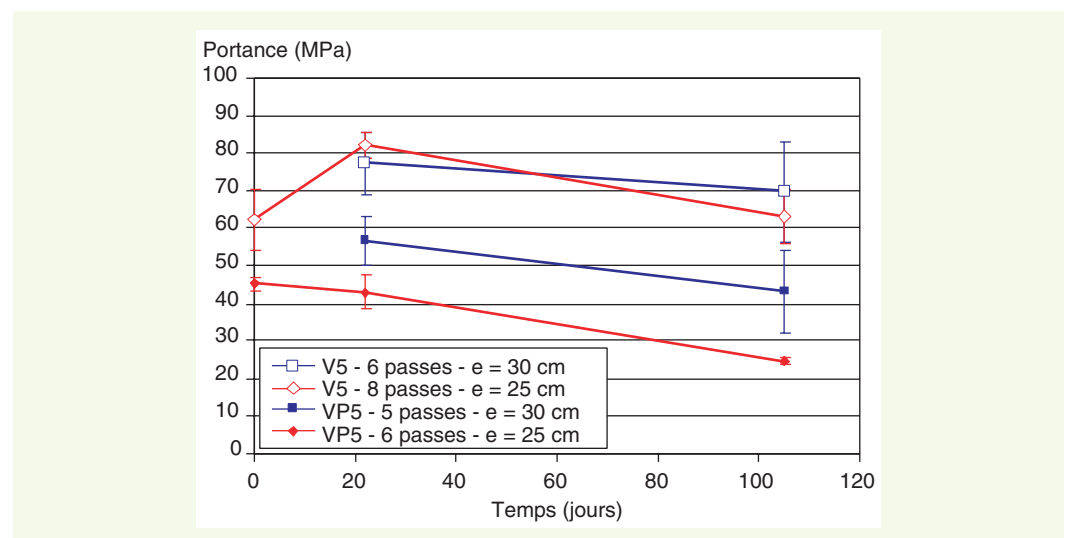
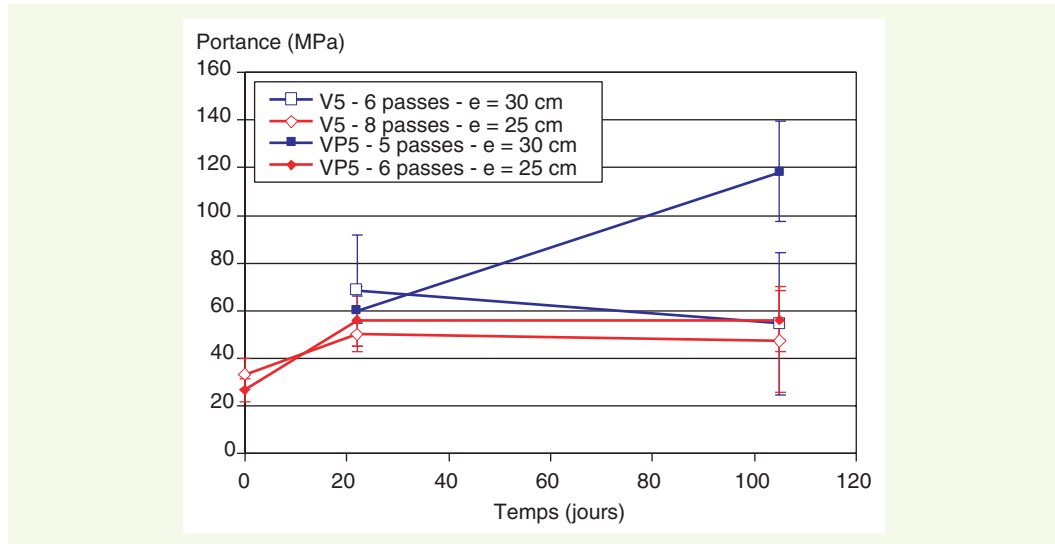


figure 19
Évolution de la portance en arase du remblai traité à 3 % de chaux lors des 105 premiers jours.



pouzzolanique sont compensés par la dégradation, probablement liée ici à l'exposition aux agents atmosphériques.

En revanche, le fait de passer de 2 à 3 % de chaux permet d'assurer une stabilisation voire une amélioration de la portance à moyen terme. Ces résultats indiquent que, même si un dosage de 3 % par rapport à un dosage de 2 %, n'apporte pas une amélioration de portance immédiate pour ce type de matériau, l'augmentation de dosage en chaux assure une meilleure pérennité de la portance à moyen-long terme.

■ Mesures de masse volumique sèche dans l'argile verte traitée à la chaux

Les mesures de masse volumique sèche ont été réalisées au gammadensimètre à profondeur variable (GPV) par le LRPC de Saint-Quentin et à la double-sonde gamma par le centre d'expérimentations routières de Rouen.

Deux à trois valeurs de masse volumique sèche ont été mesurées au GPV pour chaque couche compactée. Elles sont présentées sur les figures 20 et 21, respectivement pour un dosage en chaux de 2 et 3 %. Sur chaque graphique est reportée la valeur moyenne de masse volumique sèche en fonction de la hauteur dans le remblai, ainsi que les références à 95 et 98 % de taux de compactage. Chaque graphique correspond à un type de compacteur et permet d'apprécier aussi l'influence de l'énergie de compactage sur la portance.

figure 20
Masses volumiques sèches mesurées au GPV sur l'argile verte traitée à 2 % de chaux ($\rho_{dOPN} = 1,37 \text{ t/m}^3$), et pour les différentes modalités de compactage.

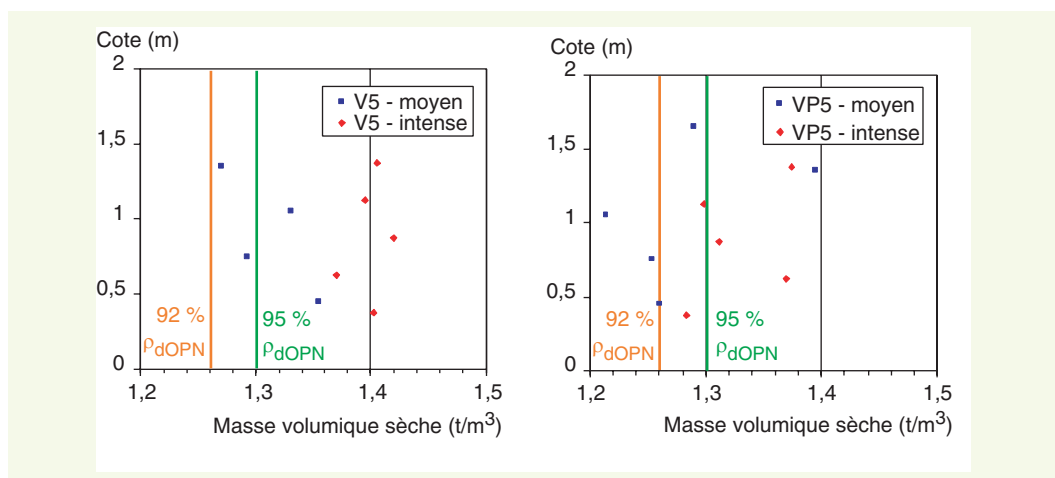
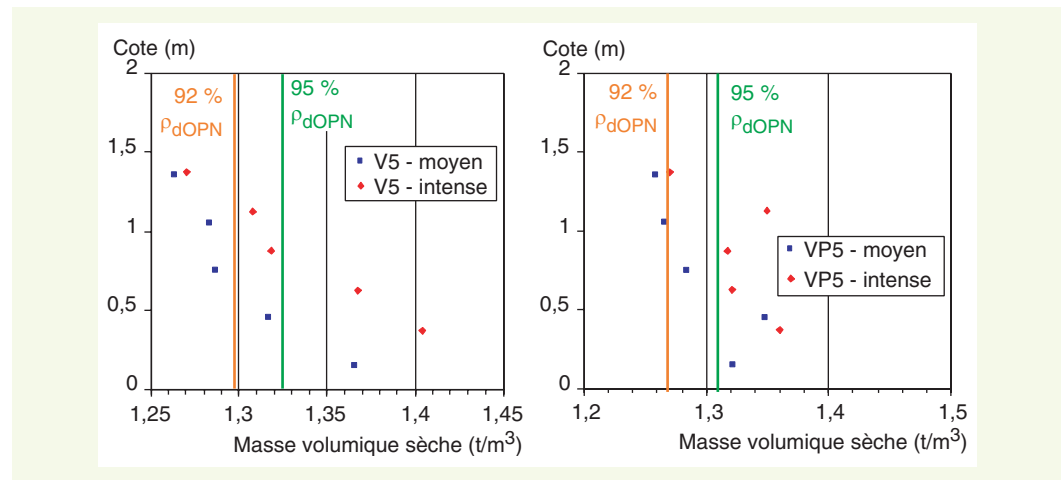


figure 21
 Masses volumiques sèches mesurées au GPV sur l'argile verte traitée à 3 % de chaux ($\rho_{dOPN} = 1,38 \text{ t/m}^3$), et pour les différentes modalités de compactage.



On notera :

- les taux de compactage obtenus sont supérieurs à 92 % ;
- les masses volumiques sèches obtenues avec un compactage intense sont supérieures à celles obtenues avec un compactage moyen ;
- les masses volumiques sèches obtenues sur le remblai traité à 2 % de chaux sont plus importantes que celles obtenues sur le remblai traité à 3 % de chaux. Ceci expliquerait, au moins en partie, les meilleures portances observées pour le traitement à 2 % de chaux ;
- à 2 % de chaux, les masses volumiques sèches sont nettement supérieures avec un compacteur V5 qu'avec un VP5, et dépassent même l'optimum Proctor.

Un profil de masse volumique sèche par modalité a été mesuré à la double-sonde gamma sur chaque remblai. Les résultats obtenus sont reportés sur les figures 22 et 23 et on peut relever les points suivants.

figure 22
 Profils de masse volumique sèche dans le remblai d'argile verte traitée à 2 % de chaux ($\rho_{dOPN} = 1,37 \text{ t/m}^3$), compactée par un compacteur V5 (à gauche) et un VP5 (à droite).

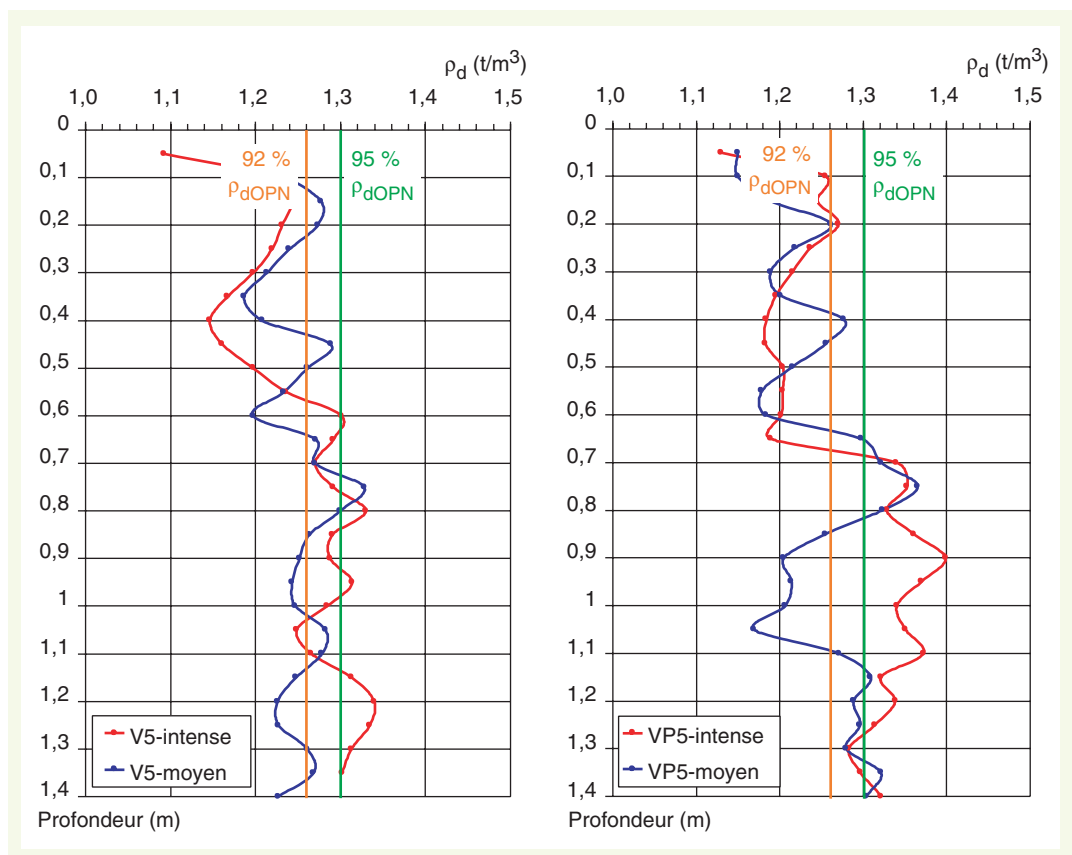
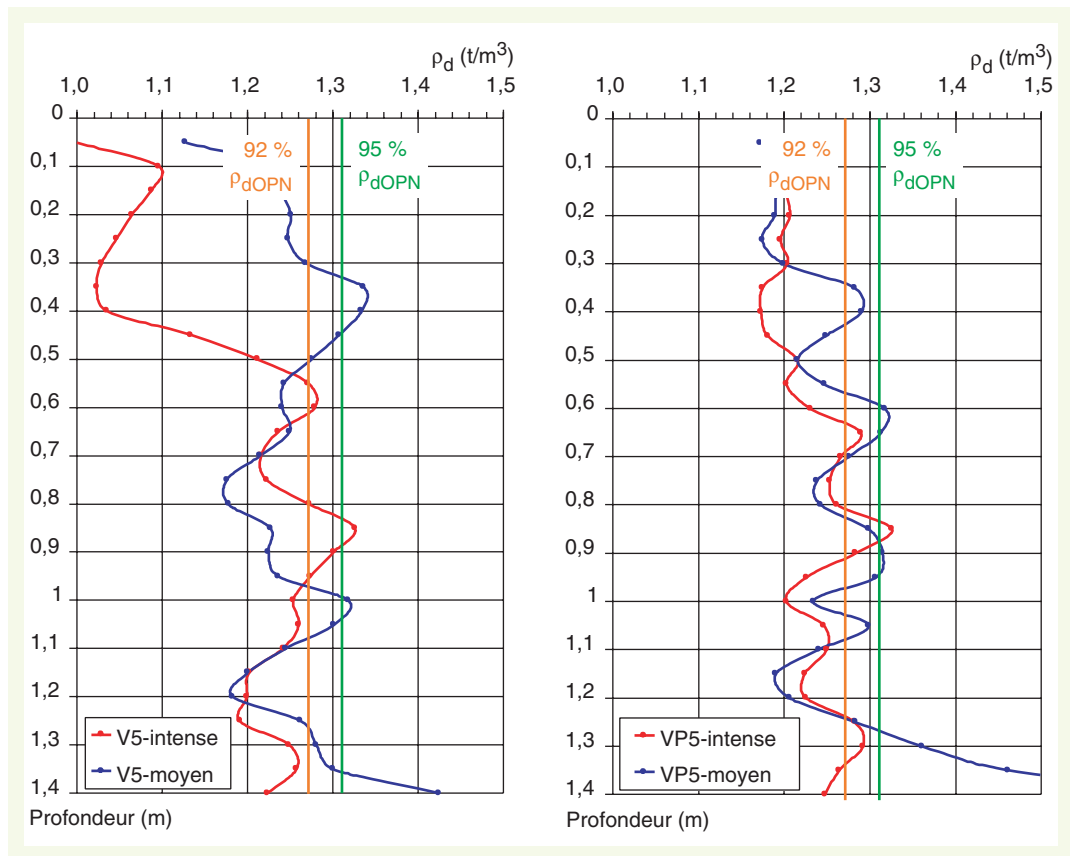


figure 23
 Profils de masse volumique sèche dans le remblai d'argile verte traitée à 3 % de chaux ($\rho_{dOPN} = 1,38 \text{ t/m}^3$), compactée par un compacteur V5 (à gauche) et un VP5 (à droite).



Pour le remblai traité à 2 % de chaux (figure 22) :

- des masses volumiques sèches plus importantes en profondeur (en moyenne sur les 70 premiers centimètres) ce qui correspond grossièrement aux deux premières couches. Les valeurs plus faibles obtenues en surface pourraient s'expliquer par le fait que l'on s'éloigne de la base drainante et que l'effet « d'enclume » s'atténue ;
- les masses volumiques sèches obtenues avec le compacteur VP5 sont plus importantes qu'avec le compacteur V5 à énergie identique ;
- en profondeur (toujours sur 70 cm) l'augmentation de l'énergie du compactage conduit à une augmentation de la masse volumique sèche en moyenne, quel que soit le type de compacteur ;
- en surface, l'apport que pourrait procurer le compacteur VP5 sur les masses volumiques sèches par rapport au compacteur V5 est difficile à mettre en lumière.

Pour le remblai traité à 3 % de chaux (figure 23) :

- les masses volumiques sèches sont plus importantes en profondeur qu'en surface, même si c'est dans une moindre ampleur que dans le cas du remblai traité à 2 % de chaux ;
- d'une manière générale, les masses volumiques sèches obtenues avec un compacteur VP5 semblent légèrement supérieures à celles obtenues avec un compacteur V5.

■ Synthèse partielle

On a pu constater pour la portance à court terme que :

- les portances mesurées sur le remblai traité à 2 % de chaux sont en moyenne supérieures à celles obtenues sur le remblai traité à 3 % de chaux ;
- dans les deux remblais, on obtient en moyenne la valeur de portance la plus élevée pour la couche compactée de façon intensive avec le V5 ;
- qu'il était nécessaire d'adapter le compactage par le compacteur VP5 sur des argiles A4.

Concernant la portance à long terme, on a constaté la mobilisation des portances plus importantes pour le remblai traité à 3 % de chaux, d'où l'importance de ne pas s'arrêter à la prise à court terme.

Les mesures de masse volumique sèche conduisent à des résultats légèrement différents selon le moyen de mesure. Les mesures au GPV ont montré que :

- les masses volumiques sèches du remblai traité à 2 % de chaux sont supérieures globalement à celles relevées dans le remblai traité à 3 % de chaux ;
- les mesures obtenues avec le V5 sont supérieures à celles obtenues avec le VP5 sur le remblai traité à 2 % de chaux ;
- les mesures obtenues avec le VP5 sont supérieures à celles obtenues avec le V5 sur le remblai traité à 3 % de chaux.

Les mesures à la double sonde Gamma ont montré que :

- les masses volumiques sèches obtenues avec le VP5 sont supérieures à celles obtenues avec le V5 sur les deux remblais ;
- l'on ne peut pas définir de règle de variation des mesures obtenues sur le remblai traité à 2 % de chaux par rapport à celui traité à 3 % de chaux.

CONCLUSIONS

Le guide de réalisation des remblais et des couches de forme [1] préconise de réaliser des études spécifiques pour définir les conditions d'emploi des sols de classe A4 en remblai. Le contenu et l'ampleur de ces études n'ont fait l'objet jusqu'à présent d'aucune recommandation, ce qui laisse les concepteurs de projet sans référentiel alors que la réutilisation de ce type de matériau peut s'avérer être parfois un enjeu crucial.

Dans le cas présenté ici, les conditions générales d'utilisation des sols A4 ont été tirées directement de celles des sols A3. Un traitement à la chaux a été appliqué pour réduire leur sensibilité aux variations d'état hydrique.

Deux grands types de questions peuvent se poser face à la réutilisation de tels matériaux :

- des questions à court terme, portant sur la possibilité de réaliser un chantier avec des matériaux très plastiques, de pouvoir les mettre en œuvre et les compacter et d'obtenir un résultat satisfaisant ;
- des questions à long terme, portant sur le risque de déformation et de dégradation dû à la sensibilité de ces matériaux aux variations d'état hydrique.

Concernant le premier type de préoccupations, les conditions météorologiques lors du chantier expérimental, dont les résultats sont présentés ici, ont permis d'assurer de très bonnes conditions de mise en œuvre. Le traitement au déblai, en remblai, la circulation des engins de chantier, le réglage n'ont pas rencontré de difficulté particulière. La mouture du matériau après malaxage au pulvérisateur de sol (figure 13) reflète bien la qualité de ces conditions. Étant donné la forte plasticité des matériaux, il est certain que des conditions météorologiques légèrement plus défavorables auraient conduit à d'importantes difficultés sur le chantier.

Le compactage de ces matériaux est un point important, et les résultats obtenus lors du chantier expérimental montrent qu'un objectif de densification q4 n'est pas systématiquement obtenu avec un compactage intense dans les conditions proposées pour les sols A3. Ces résultats conduisent en première approche à préconiser une augmentation de l'énergie de compactage, par exemple en gardant l'épaisseur maximale de 25 centimètres et en augmentant le nombre de passes à 10 au lieu de 8, dont l'effet resterait à vérifier. Même si l'on peut maintenir l'idée qu'un compacteur au pied dameur permet un meilleur pétrissage, le type de compacteur ne paraît pas avoir une influence majeure au vu des mesures de masse volumique. On serait même plutôt conduit à préconiser d'appliquer le même nombre de passes pour les deux types de compacteur.

Les portances à la dynaplaque mesurées à l'issue du chantier sont relativement satisfaisantes, dans la mesure où le seuil de 50 MPa est dépassé dans la plupart des mesures. On a pu observer qu'un dosage à 3 % permettait de pérenniser cette portance à 100 jours, alors que le dosage à 2 % n'évitait pas une diminution de la portance. On notera que, vu la plasticité des matériaux, un dosage de 3 % ne paraît pas aberrant.

Concernant la hauteur des remblais réalisés en matériaux A4, des compléments d'expérimentations seraient nécessaires pour s'assurer de la stabilité de remblais de plus de cinq mètres de hauteur avec ce type de matériaux.

Les talus des remblais en sols A4, même traités, doivent faire l'objet d'une attention particulière dans la mesure où il n'est pas complètement avéré que leur sensibilité aux cycles séchage-humidification est annihilée. Cette sensibilité est susceptible de causer des désordres importants jusqu'en plate-forme par le phénomène de reptation de pente [6]. Des essais de gonflement-retrait peuvent apporter une idée de ce risque mais le compactage de ces matériaux dans les talus doit, dans tous les cas, constituer une préoccupation centrale lors de la réalisation du chantier. La méthode du talus excédentaire ou du compactage en W doit donc être appliquée systématiquement et des mesures ponctuelles de masse volumique sèche dans les talus doivent être réalisées pour vérifier l'obtention d'un taux de compactage supérieur à 95 %. S'il est prévisible au moment des études que ces conditions ne seront pas respectées, il est préférable de prévoir d'utiliser dans les talus un matériau insensible sur une largeur de 2 mètres et de réserver l'emploi des argiles très plastiques, mêmes traitées, dans le cœur de l'ouvrage.

La question du comportement à long terme a été abordée dans le cadre de ce chantier expérimental mais les résultats n'ont pas été présentés dans cet article car ils sont encore au stade de l'exploitation et de l'interprétation. Des observations topographiques, des mesures au pénétromètre, des carottages et des mesures de portance à la dynaplaque ont été réalisées trois ans après la construction des remblais. On en tire globalement les informations suivantes :

- la topographie en plate-forme n'a mis en évidence aucune évolution notable, ce qui permet de penser que le matériau n'a pas subi de phénomènes de retrait-gonflement ;
- les pénétromètres réalisés dans le cœur des remblais indiquent une augmentation de la résistance qui pourrait résulter de la prise pouzzolanique à long terme ;
- les mesures à la dynaplaque montrent une baisse importante de portance après trois ans, mais ces résultats sont à considérer avec prudence dans la mesure où la plate-forme n'était pas protégée du gel. Cette dégradation apparente de l'arase pourrait ainsi résulter des cycles gel-dégel, qui sont importants dans cette région ;
- les échantillons prélevés par carottages sont d'une qualité variable et se délitent très facilement lors de leur manipulation. Ainsi, il n'a pas été possible d'obtenir de moules œdométriques intacts dans les carottes, ce qui peut paraître surprenant pour un matériau aussi plastique à l'origine. Ceci montre que le traitement a profondément modifié le matériau originel et que ces modifications sont pérennes, au moins à cette échelle de temps (trois ans).

En conclusion, les éléments apportés par ce chantier expérimental montrent que l'utilisation d'argiles très plastiques en corps de remblai est envisageable, même si cette réutilisation nécessite des moyens particuliers (traitement avec malaxage au pulvérisateur de sol, compactage très intense) et qu'elle est conditionnée par des conditions météorologiques favorables. Des expériences similaires avaient été faites antérieurement, parfois même dans le cadre d'une utilisation en couche de forme [3, 4] et leurs conclusions étaient aussi plutôt positives.

Ceci étant, les questions posées par ce chantier expérimental sur le comportement à long terme de ces argiles très plastiques traitées à la chaux indiquent les lignes que devraient suivre les recherches à venir, notamment concernant la possibilité de réaliser des remblais de hauteur supérieure à 5 mètres et sur l'efficacité et la durabilité des effets du traitement sur l'insensibilité aux variations d'état hydrique, notamment dans les talus.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- 1 **SETRA-LCPC**, *Traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques. Application à la réalisation des remblais et des couches de forme (GTS)*, Guide technique SETRA-LCPC, **2000**, 240 pages.
- 2 **SCHAEFFNER M., CAUSERO M.**, Utilisation des marnes du Keuper en terrassement. Chantier expérimental de traitement à la chaux, *Bulletin des laboratoires des ponts et chaussées*, **1974, 74**, 45-64.
- 3 **DELFAUT A.**, Traitement à la chaux vive et au ciment des argiles plastiques du Sparnacien et de la région parisienne. Étude de laboratoire, *Bulletin des laboratoires des ponts et chaussées*, **1990, 169**, 13-22.
- 4 **CIMPELLI C., KERGOËT M.**, Utilisation en couche de forme des argiles vertes de Romainville traitées à la chaux et au ciment, *Bulletin des laboratoires des ponts et chaussées*, **1974, 73**, 9-15.
- 5 **SETRA-LCPC**, *Réalisation des remblais et des couches de forme (GTR)*, Guide technique SETRA-LCPC, **2000**, 2 fascicules, 98 et 102 pages.
- 6 **MIEUSSENS C.**, Déformations cycliques et irréversibles dans les remblais argileux, *Revue française de géotechnique*, **2000, 90**, 47-59.