

# VALORISATION DES ARGILES TRÈS PLASTIQUES DANS LE DOMAINE DES TERRASSEMENTS: DU LABORATOIRE AU REMBLAI EXPERIMENTAL

**C. Hung, L. Miard, O. Yazoghli-Marzouk**

Département Laboratoire d'Autun - CETE de Lyon - France

[Catherine.Hung@developpement-durable.gouv.fr](mailto:Catherine.Hung@developpement-durable.gouv.fr)

[Ludovic.Miard@developpement-durable.gouv.fr](mailto:Ludovic.Miard@developpement-durable.gouv.fr)

[Oumaya.Marzouk@developpement-durable.gouv.fr](mailto:Oumaya.Marzouk@developpement-durable.gouv.fr)

**M. Froumentin**

Centre d'Expérimentation et de Recherche de Rouen - CETE Normandie Centre - France

[Michel.Froumentin@developpement-durable.gouv.fr](mailto:Michel.Froumentin@developpement-durable.gouv.fr)

**Y. Boussafir**

IFSTTAR Paris- Institut français des sciences et technologies des transports, de l'aménagement et des réseaux - France

[yasmina.boussafir@ifsttar.fr](mailto:yasmina.boussafir@ifsttar.fr)

## RÉSUMÉ

Les argiles très plastiques sont connues pour être des matériaux quasi-imperméables et compacts dont les teneurs en eau varient très lentement. On rencontre fréquemment pour ces sols des phénomènes de retrait et de gonflement ainsi que de stabilité. Leur utilisation en remblai n'est envisageable qu'à l'appui d'éléments techniques précis, définissant leurs conditions d'utilisation et de mise en œuvre. Pour la réalisation des couches de forme, leur utilisation est interdite. Dans un contexte d'économie des ressources naturelles (objectif zéro emprunt / zéro dépôt), douze partenaires comprenant des entreprises de terrassement, maîtres d'œuvre, producteurs de liants, laboratoires de recherche et universités se sont regroupés dans un projet de recherche commun dénommé "TerDOUEST", financé par l'Agence Nationale pour la Recherche (ANR).

Dans ce projet, se déroulant sur la période 2008-2012, des investigations en vraie grandeur sont menées sur un remblai expérimental afin d'étudier la possibilité de valoriser les argiles très plastiques après traitement dans différentes applications classiques du terrassement : la base de remblai inondable, le corps de remblai, la partie supérieure des terrassements et la couche de forme. Selon des emplois prédéfinis, deux types de traitements : chaux seule et mixte chaux/ciment. Ces deux procédés ont l'avantage d'être simples, économiques et écologiques, ils ne nécessitent pas en effet des opérations de déblais ou de substitution. Le remblai expérimental a été constitué pour moitié d'un sol conventionnel dit de référence (limon peu plastique de type A2 suivant la classification française NF P 11-300) et pour l'autre moitié d'une argile plastique de type A4 (NF P 11-300). Il a été construit en avril 2010 avec les moyens classiques d'un atelier de traitement et de mise en œuvre, en utilisant les sols issus directement des emprunts du chantier courant. L'ouvrage est instrumenté et son suivi est prévu sur plusieurs années.

Au préalable à la construction du remblai, des essais de laboratoire ont permis d'obtenir des résultats concluants sur les résistances mécaniques à court et à long terme de l'argile traitée. L'article présente les résultats obtenus en laboratoire et décrit la construction de l'ouvrage expérimental.

## 1 Introduction

Géotechniquement, les argiles très plastiques sont classées A4 (suivant la norme NF P 11-300). D'aspect très compact, la variation extrêmement lente de leur état hydrique les rend quasiment imperméables. Selon le Guide Technique de « Réalisation des remblais et des couches de forme » (GTR – SETRA 1992 [1]) l'utilisation des argiles très

plastiques en état est à proscrire. Leur forte plasticité et leur importante cohésion occasionnent des difficultés de mise en œuvre. Des phénomènes de retrait/gonflement sont couramment constatés, l'assemblage et la faiblesse de certaines liaisons entre feuillets argileux conduisent à une « glissance » particulière qui limite fortement la stabilité de l'ouvrage à long terme. La valorisation de ces argiles très plastiques par traitement semblait une solution envisageable grâce aux améliorations apportées par la chaux et les liants hydrauliques. Les techniques de traitement des argiles plastiques sont étudiées depuis la fin des années soixante en France. (A. Le Roux 1969 [2], M. Schaeffner et M. Causero 1974 [3], C. Cimpelli et M. Kergoët 1974 [4]). A la fin des années quatre-vingt, grâce à une forte évolution des techniques de traitement, la réalisation de couches de forme traitées dans les structures routières est devenue de plus en plus fréquente. A la fin des années 90 un guide méthodologique a été rédigé ; le Guide Technique de traitement des Sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques (GTS – LCPC-SETRA 2000 [5]). Une étude plus récente, sur le chantier de l'A34, la construction et l'étude d'un remblai expérimental de faible hauteur (V. Berche 2009 [6]) a permis de donner des résultats sur le comportement à court et à long terme des argiles traitées à la chaux.

## 1.1 Objectifs de l'étude

La réalisation et la maîtrise des techniques de traitement des sols très plastiques doit nécessairement conduire à l'élaboration d'une méthodologie applicable en chantier. La préparation des sols à traiter, les différentes opérations de terrassement jusqu'à la mise en service de l'ouvrage et son suivi dans le temps doivent être maîtrisés. Cependant, une importante lacune est constatée en termes de connaissances des mécanismes physico-chimiques qui constituent la prise hydraulique. L'appréciation de la durabilité d'un traitement doit être perçue à différentes échelles ; de la particule à l'ouvrage. C'est dans cette perspective ambitieuse que le projet TerDOUEST a été initié sous l'impulsion du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées. Il s'agit d'un projet soutenu et co-financé par l'Agence Nationale pour la Recherche, s'étalant sur une période de 4ans (2009 à 2012)

Quatre axes d'étude ont été définis ;

- l'étude physico-chimique à multi-échelle (module A),
- l'observation de la durabilité des sols traités dans le temps (Module B),
- la réalisation d'un ouvrage expérimental dans le cadre d'un chantier courant (Module C),
- le développement d'outils d'analyses économiques et environnemental (Module D).

Ce projet ambitieux regroupe douze partenaires comprenant des laboratoires de recherches, des entreprises et des maîtres d'œuvre et d'ouvrage. L'article présente dans un premier temps l'étude de traitement en laboratoire puis la méthodologie employée lors de la réalisation de l'ouvrage expérimental à partir du limon et de l'argile très plastique traités dans le cadre d'un chantier courant.

L'étude de traitement comporte notamment une approche comparative des effets du traitement entre des argiles très plastiques et un limon dont le comportement après traitement est connu. Les résultats de l'ensemble du projet TerDOUEST feront l'objet d'un rapport de recherche et ne sont donc pas intégralement présentés dans ce document.

## 1.2 Présentation du site d'étude

Le remblai expérimental (Figure1) s'intègre dans le cadre de la déviation d'Héricourt sur la RD 438 dans l'est de la France sous la maîtrise d'ouvrage du Conseil Général de Haute-Saône. Il a été choisi car il concentrait les paramètres intéressants pour le projet TerDOUEST ;

- les deux types de matériaux d'étude sont disponibles dans l'emprise du chantier ; l'argile très plastique A4 et le limon A2 ,

- le remblai est intégré dans le cadre d'un chantier existant. Il a été réalisé dans les mêmes conditions. Il constitue une digue extérieure d'un bassin d'assainissement venant épauler le remblai de la section courante,
- le cours d'eau de la Lizaine longeant le site apporte les conditions d'immersion de la base du remblai grâce à ses débordements et aussi par la présence d'une nappe phréatique proche de la surface (-1.80m sous le Terrain Naturel).

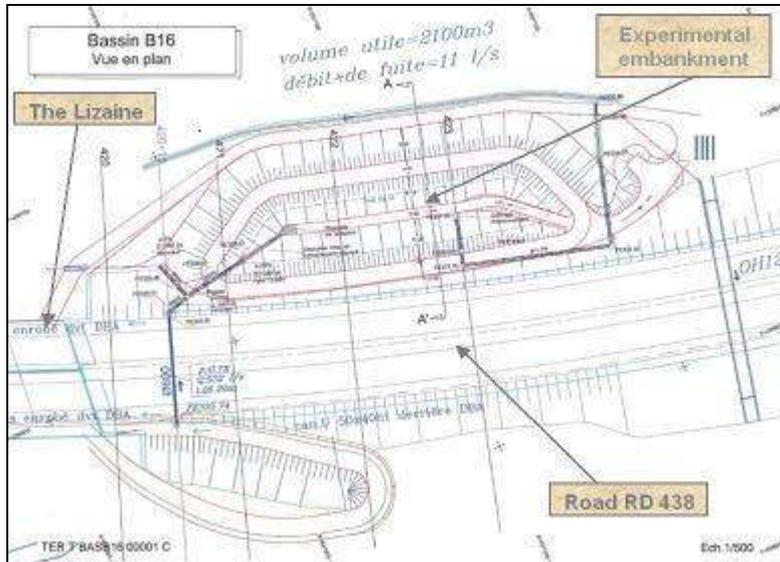


Figure 1 - Vue en plan du remblai expérimental

Le remblai expérimental a été réalisé par l'entreprise Roger Martin, associé au projet TerDOUEST par convention. Les matériaux ont été prélevés durant l'été 2009. L'échantillonnage des argiles a été effectué en scarifiant le déblai de la section courante à la charrue. Un double malaxage au pulvérisateur de sols RACCO 550 a permis d'obtenir une mouture 0/50 à 0/100mm (Figure 2). Visuellement, les mottes argileuses présentent un aspect très plastique et compact de couleur grise-beige contenant des galets. Les limons ocres peu plastiques (Figure 3) ont été prélevés directement à la pelle mécanique.



Figure 2 - Mouture du matériau argileux



Figure 3 - Mouture du matériau limoneux

## 2 Etude en laboratoire

L'objectif de la préparation des matériaux est d'obtenir une mouture homogène de 0/6mm nécessaire à son étude en laboratoire. Les matériaux argileux se présentaient sous la

forme de mottes compactes et humides. Elles sont fractionnées manuellement au couteau, puis réparties sur une bâche et séchées à l'air libre pendant 2 jours. Elles sont ensuite mises dans des bacs puis placées en étuve afin d'être séchées à une température ne dépassant pas 50°C. Les moutures séchées sont alternativement fractionnées au cutter Hobart (Figure 4) puis tamisées à 6 mm. Le refus au tamis de 6 mm est repassé au cutter. Les éléments de type gravas et galets supérieurs à 6mm sont extraits. Les matériaux sont homogénéisés puis remis en sacs. Une quantité de 300 kg de matériau de fraction 0/6mm a été obtenue à une teneur en eau d'environ 14% (Figure 5).



Figure 4 - Fractionnement au Cutter Hobart



Figure 5 - 300 kg d'argiles de fraction 0/6mm

## 2.1 Identification des produits de traitement

Différents types d'essais d'identification ont été réalisés sur la mouture de fraction 0/6mm pour les deux types de matériaux dans le but de la classer selon la norme NF P 11-300. Les résultats de l'identification des matériaux sont présentés dans le tableau 1 suivant :

Tableau 1 - Identification des matériaux

Matériaux	Type argileux	Type limoneux
<p>Analyse granulométrique par tamisage jusqu'à 80µm (NF P 94-056) et par sédimentation pour les dimensions inférieures à 80µm (NF P 94-057)</p>	<p style="text-align: center;">Analyse granulométrique des sols (NF P 94-056 et NF P 94-057)</p> <p style="text-align: center;">Tamis (mm)</p> <p style="text-align: center;">Taux (%)</p> <p style="text-align: center;">— argile A1 — limon A2</p>	

Figure 6 - Courbes granulométriques

Limite d'Atterberg ( NF P 94-051)	Limite de liquidité = 79 Limite de plasticité = 34 à 35 Ip = 44 à 45	Limite de liquidité = 40 Limite de plasticité = 22 Ip = 18
Valeur au bleu de Méthylène ( NF P 94-068)	4,2 à 6,3 g/100g de sol	2.1 à 2,2 g/100g de sol
Teneur en eau naturelle (NF P 94-050)	29,5%	20,5%
Optimum Proctor Naturel (OPN) (NF P 94-093)	$\rho_{dOPN} = 1,50 \text{ g/cm}^3$ WOPN = 26,4%	$\rho_{dOPN} = 1.76 \text{ g/cm}^3$ WOPN = 17.9%
Indice Portant Immédiat (NF P 94-078)	IPI = 9	IPI = 16
Masse volumique des particules solides des sols ( NF P 94-054)	$\rho_s = 2,74 \text{ g/cm}^3$	$\rho_s = 2,70 \text{ g/cm}^3$
Classification GTR (NF 11-300)	A4	A2

Les liants routiers suivants ont été utilisés pour le traitement :

- Une chaux (CaO) de type sidérurgique contenant 99% de chaux vive fournie par la société LHOIST.
- Un ciment normalisé CEMII/A 42.5 LL provenant de l'usine HOLCIM d'Altkirch fourni par CIMBETON

## 2.2 Références de compactage des matériaux traités

Les essais compactage sur matériaux naturel et traités à l'énergie Proctor Normal ont permis d'obtenir les courbes suivantes ;

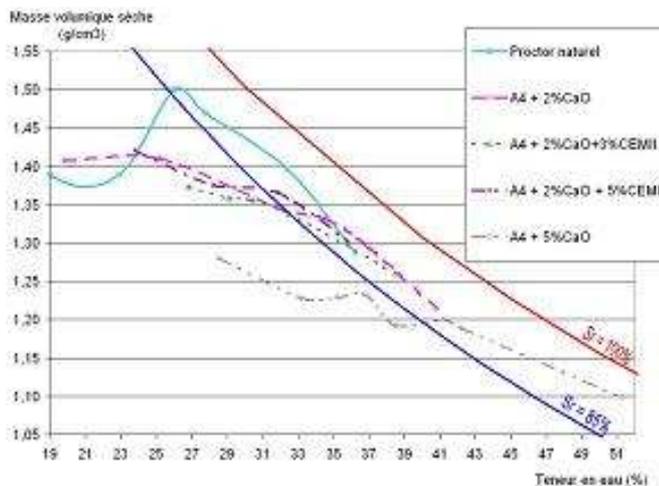


Figure 7 - Courbes OPN naturel et traitées des argiles A4

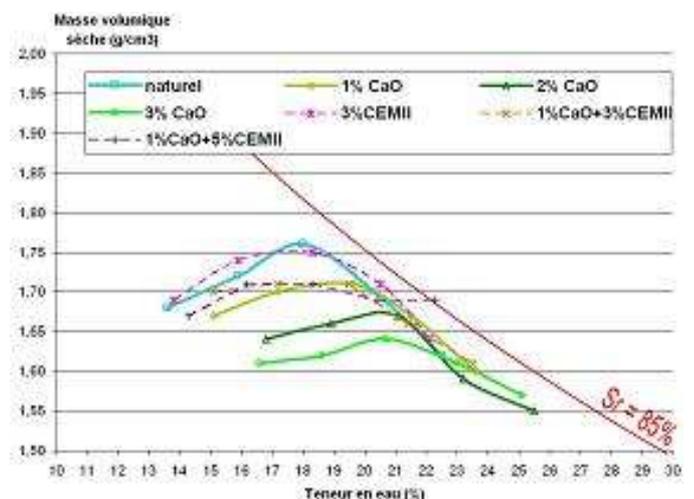


Figure 8 - Courbes OPN naturel et traitées des limons A2

Pour les argiles A4 , le choix des références Proctor sur matériaux traités (tableau 2) a été effectué en considérant l'intersection entre la courbe de Protor et la courbe de saturation  $S_r$  à 85% (Figure 7).

Tableau 2 - Références OPN naturelle et traitées

Modalités de traitement	Références Proctor retenues	
	A4	A2
Naturel	$\rho_{dOPN} = 1.50 \text{ g/cm}^3$ $WOPN = 26.4 \%$	$\rho_{dOPN} = 1.76 \text{ g/cm}^3$ $WOPN = 17.9 \%$
1%CaO	Non réalisé	$\rho_{dOPN} = 1.72 \text{ g/cm}^3$ $WOPN = 18.8 \%$
2%CaO	$\rho_{dOPN} = 1,34 \text{ g/cm}^3$ $WOPN = 32,5\%$	$\rho_{dOPN} = 1.68 \text{ g/cm}^3$ $WOPN = 20.3 \%$
3%CaO	Non réalisé	$\rho_{dOPN} = 1.64 \text{ g/cm}^3$ $WOPN = 20.9 \%$
3%CEMII	Non réalisé	$\rho_{dOPN} = 1.76 \text{ g/cm}^3$ $WOPN = 17.7 \%$
1%CaO+3%CEMII	Non réalisé	$\rho_{dOPN} = 1.71 \text{ g/cm}^3$ $WOPN = 18.7 \%$
1%CaO+5%CEMII	Non réalisé	$\rho_{dOPN} = 1.71 \text{ g/cm}^3$ $WOPN = 17.5 \%$
2%CaO + 3%CEMII	$\rho_{dOPN} = 1,34 \text{ g/cm}^3$ $WOPN = 32,5\%$	Non réalisé
2%CaO + 5%CEMII	$\rho_{dOPN} = 1,37 \text{ g/cm}^3$ $WOPN = 31,0\%$	Non réalisé
5%CaO	$\rho_{dOPN} = 1,19 \text{ g/cm}^3$ $WOPN = 40,0\%$	Non réalisé

L'apport en matière sèche par les liants et l'aération due au malaxage avec le cutter Hobart entraînent inévitablement une perte en eau sur les matériaux traités. Celle-ci est plus ou moins conséquente en fonction des matériaux, des quantités de chaux et/ou de ciment ajoutées. Le traitement à la chaux engendre des pertes en eau plus importantes que l'ajout de ciment. Ces pertes en eau (Tableau 3) sont prises en compte lors de la préparation des matériaux à traiter pour la confection des éprouvettes puis sur chantier lors de la réalisation du remblai expérimental.

### 2.3 Critères de jugement du Guide Technique sur le traitement des Sols (GTS)

Selon les critères retenues en France selon le GTS [5], les performances recherchées après un traitement dépendent de la position des matériaux dans l'ouvrage.

Les essais de laboratoire permettant d'évaluer les performances sur les matériaux traités sont les suivants :

- L'Indice Portant Immédiat (IPI) réalisé selon la NF P 94-078
- L'Indice CBR (ICBR) réalisé selon la NF P 94-078
- La résistance en compression simple ( $R_c$ ) selon la NF EN 13286-41
- La résistance en traction indirecte ( $R_{tb}$ ) selon la NF EN 13286-42
- Le module d'élasticité (E) selon la NF EN 13286-43
- Le délai de maniabilité ( $W_{pc}$ ) selon la NF EN 13286-45
- L'aptitude au traitement ( $R_{tb}/G_v$ ) selon la NF P 94-100

Certains essais de laboratoire sont toujours en cours (notamment le cas pour les essais réalisés avec des délais de cure longs) ; le rapport de fin de projet de recherche rendra compte de l'ensemble des résultats. Les premiers d'entre eux sont présentés dans cet article.

### 2.4 Modalités de confection et de conservation des éprouvettes traitées

Selon les préconisations du GTS [5], les éprouvettes destinées à l'essai de résistance en traction indirecte ( $R_{tb}$ ) avec mesure du module d'élasticité (E) ont été confectionnées à une compacité de 96% de l'énergie proctor normal. Les dimensions des éprouvettes sont

de 5cm de diamètre pour 5 cm de hauteur. Concernant les éprouvettes qui ont été soumises à l'essai de compression simple (Rc), elles ont été confectionnées à une compacité de 98.5% de l'énergie proctor normal. Les dimensions de l'éprouvettes sont de 5cm de diamètre pour une hauteur de 10cm. Les éprouvettes ont une forme cylindrique. Elles ont été conservées pendant la durée de cure définie par le GTS [5] dans une salle de conservation à 20°C. Concernant les cures en immersion, les éprouvettes ont été immergées dans un bain thermostaté réglé à 20°C.

#### 2.4.1 Objectifs du traitement pour une réutilisation en remblai et en partie supérieure des terrassements

Tableau 3 - Préconisation du GTS pour une réutilisation en remblai

Application	Critères d'évaluation	Valeurs ou seuils à viser
Base de remblai inondable	Rc 14j + 14j immersion	≥ 0,5 MPa
Corps de remblai	IPI	>6
Partie supérieure des terrassements	IPI et ICBR après 4j d'immersion	ICBR/IPI ≥ 1

Tableau 4 - Résultats obtenus sur les critères de réutilisation en remblaiement en zone difficile

CURE	Rc (MPa) ARGILE A4			
	2% CaO	5% CaO	2% CaO + 3% CEMII	2% CaO + 5% CEMII
14j + 14j immersion	0,26	0,31	0,8	0,92
28j + 32j immersion	0,27	0,39	x	1,09

Pour une réutilisation en base de remblai, les résultats (tableau 4) montrent que les matériaux argileux n'atteignent le seuil visé que pour les traitements effectués avec le traitement chaux mixte ciment.

Tableau 5 - Résultats obtenus sur les critères de réutilisation en corps de remblai et en PST

IPI LIMON A2						
naturel	1% CaO	2% CaO	3% CaO	3% CEMII	1% CaO + 3% CEMII	1% CaO + 5% CEMII
16	23	26	31	24	27	32

IPI ARGILE A4					
naturel	2% CaO	5% CaO	2% CaO+3% CEMII	2% CaO + 5% CEMII	
9	12	16	11	15	

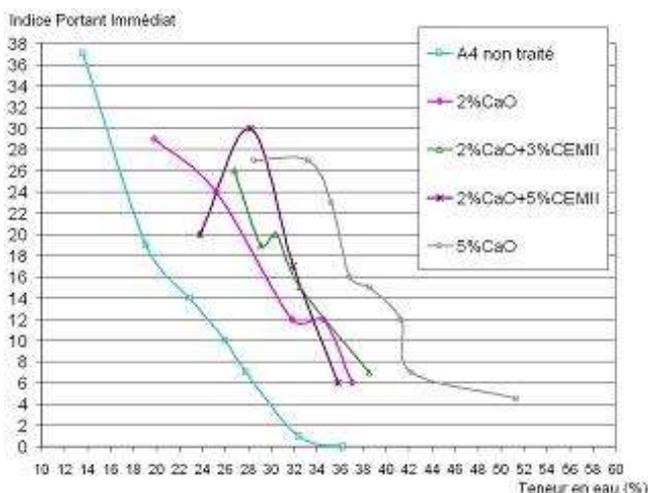


Figure 9 - Courbes IPI sur A4 naturelle et traitée

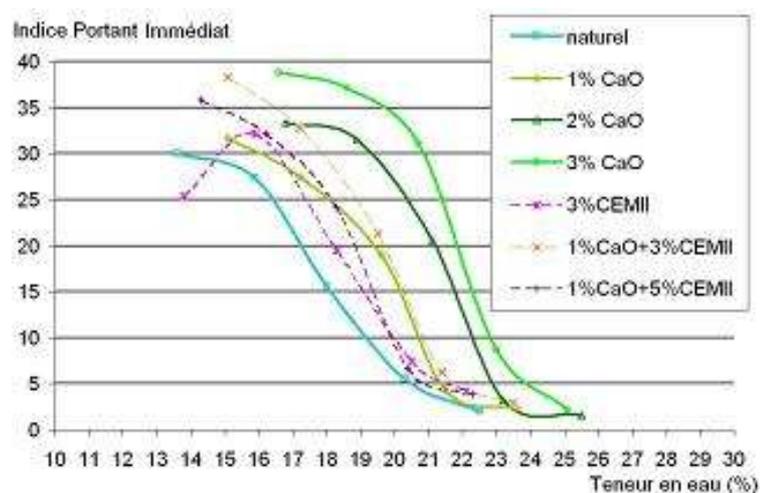


Figure 10 - Courbes IPI sur A2 naturel et traité

En réutilisation en corps de remblai, les résultats (tableau 5 et figures 9 et 10) montrent que les deux matériaux traités satisfont pleinement aux critères du GTS [5].

Tableau 6 - Critères de réutilisation en PST

ICBR/IPI - LIMON A2						
naturel	1% CaO	2% CaO	3% CaO	3% CEMII	1% CaO + 3% CEMII	1% CaO + 5% CEMII
	2	2	2	3	5	6

ICBR/IPI - ARGILE A4				
naturel	2% CaO	5% CaO	2% CaO+ 3% CEMII	2% CaO+ 5% CEMII
	x	1	5	4

En Partie Supérieure des Terrassements (PST), les résultats (tableau 6) que le critère ICBR/IPI  $\geq 1$  est validé pour tous types de traitements et matériaux confondus.

#### 2.4.2 Objectifs du traitement pour une réutilisation en couche de forme (CDF)

Tableau 7 - Préconisation du GTS pour une réutilisation en CDF

Application	Critères d'évaluation	Valeurs ou seuil à viser
<b>Cas de la chaux seule</b>		
Comportement sous trafic	IPI et ICBR à 4j immersion	ICBR $\geq 20$ et ICBR/IPI $\geq 1$
Comportement au gel	Rc ou Rtb	Rc $\geq 2,5$ Mpa ou Rtb $\geq 0,25$ MPa
<b>Cas de la chaux mixte ciment</b>		
Comportement sous trafic	Rc à 7, 28, 60, 90, 120j	Rc $\geq 1$ MPa
Résistance à l'immersion au jeune âge	Rc à (28j +32j d'immersion)	Rci/Rc $\geq 0,60$
Comportement au gel	Rc ou Rtb	Rc $\geq 2,5$ Mpa ou Rtb $\geq 0,25$ MPa
Performances à long terme	Rt/E à 90 jours	Classification Rt/E

- Critères liés à la circulation au jeune âge :
  - Dans le cas du traitement à la chaux seul ;

Tableau 8 - Résultats obtenus pour des critères de comportement à la circulation au jeune âge

ICBR - LIMON A2			ICBR - ARGILE A4	
1% CaO	2% CaO	3% CaO	2% CaO	5% CaO
36	54	64	x	18

Tableau 9 - Résultats obtenus pour des critères de comportement au gel

CURE (j)	Rc (MPa) - A4
	5% CaO
7	0,3
28	0,4
60	0,4
90	0,6
120	0,6

Les limons traités présentent des résultats (tableau 8) tout à fait acceptables pour une circulation après 4 jours de cure. S'agissant des argiles, le critère ICBR  $\geq 20$  (tableau 8) n'est pas validé même si pour le dosage à 5%CaO, on obtient un résultat proche des attentes. Le critère ICBR/IPI  $\geq 1$  (tableau 6) est validé pour tous les traitements confondus pour les deux types de matériaux. Jusqu'à 120 j de cure, les résultats d'essais (tableau 9)

montrent que les matériaux argileux traités ( même à 5%CaO ) ne satisfont pas aux critères de résistance au gel (tableau 9). Des résultats obtenus pour des durées de cure plus importantes sont attendues dans le rapport définitif.

- Dans le cas d'un traitement mixte chaux- ciment ;

Tableau 10 - Résultats obtenus sur les critères de comportement à la circulation au jeune âge

CURE (j)	Rc (MPa) A2			Rc (MPa) A4	
	3% CEMII	1% CaO + 3% CEMII	1% CaO + 5% CEMII	2% CaO + 3% CEMII	2% CaO + 5% CEMII
2	1,0	1,4	1,6	x	x
4	0,9	1,9	1,9	x	x
7	1,0	1,7	2,3	0,8	0,9
28	1,1	2,1	2,9	1,2	1,2
60	1,2	2,4	3,3	1,3	1,3
<b>90</b>	<b>1,4</b>	<b>2,6</b>	<b>3,9</b>	<b>1,3</b>	<b>1,8</b>
120	x	x	x	1,4	2,2

Sur les matériaux limoneux A2 traités, le rétablissement du trafic est permis dès deux jours de cure comme le montre les résultats du tableau 10. Sur les matériaux argileux traités, il faut attendre 28j avant de pouvoir restituer la couche à la circulation.

- Critères liés à l'immersion:

Tableau 11 - Résultats obtenus sur les critères de comportement à l'immersion au jeune âge

CURE	Rc - Rci (MPa) - A2			Rc - Rci (MPa) - A4	
	3% CEMII	1% CaO + 3% CEMII	1% CaO + 5% CEMII	2% CaO + 3% CEMII	2% CaO + 5% CEMII
28	1,1	2,2	3,0	1,2	1,2
14 + 14	0,7	1,7	2,3	x	x
<b>Rci/Rc28</b>	<b>0.64</b>	<b>0.77</b>	<b>0.77</b>	<b>x</b>	<b>x</b>
60	1,3	2,4	3,3	1,3	1,3
28 + 32	0,7	1,7	2,5	1,0	1,5
<b>Rci/Rc60</b>	<b>0.54</b>	<b>0.71</b>	<b>0.76</b>	<b>0.77</b>	<b>1.15</b>
90	1,4	2,6	3,9	1,3	1,8
28 + 62	x	x	x	1,4	1,6
<b>Rci/Rc90</b>	<b>x</b>	<b>x</b>	<b>x</b>	<b>1.08</b>	<b>0.88</b>

A l'exception de la modalité à 3% de CEMII pour le limon A2, les résultats (tableau 11) obtenus montrent que le critère Rci/Rc est validé pour l'ensemble des traitements mixte chaux-ciment, ce qui permet une immersion au jeune âge sans dégradation durable des effets du traitement.

- Critères liés à la résistance au gel :

Tableau 12 - Critères d'évolution de la résistance mécanique dans le temps

CURE	Rtb (MPa) - A2			Rtb (MPa) - A4	
	3% CEMII	1% CaO + 3% CEMII	1% CaO + 5% CEMII	2% CaO + 3% CEMII	2% CaO + 5% CEMII
7	0.11	0.23	0.31	x	x
28	0.28	0.22	0.14	x	x
<b>90</b>	<b>0.40</b>	<b>0.30</b>	<b>0,18</b>	<b>0.14</b>	<b>0.22</b>
180	x	x	x	0.22	0.24
360	x	x	x	0,19	0,22

La résistance mécanique des matériaux traités vis à vis des effets du gel n'est satisfaisante que pour un traitement du limon à 3%CEMII et à 1%CaO+3%CEMII à partir de 90j de cure. Les résultats (tableau 12) obtenus sur les matériaux type A2 montrent des niveaux de résistance faible.

- **Classification Rt/E**

Tableau 13 - Classement des argiles A4 en fonction de Rt/E

A4 – cure à 90j		
Traitement	Rt (MPa)	E (MPa)
2%CaO+3%CEMII	0,11	1309
2%CaO+5%CEMII	0,18	2607

La résistance à la traction directe est calculée par :  $R_t = 0.8 \times R_{tb}$ .

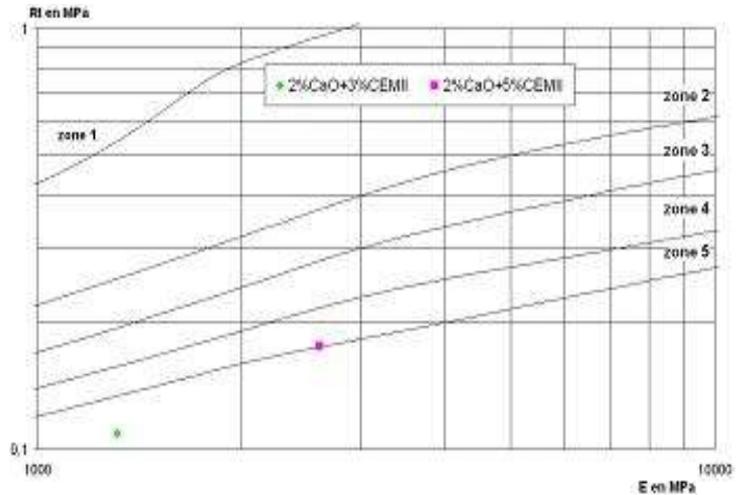


Figure 11 - Classification Rt/E des A4 traitées

Pour un traitement en place, la limite de la zone 5 est atteinte dans le diagramme Rt/E, à 90j de cure pour une argile A4 traitée à 2%CaO+5%CEMII (Figure 11).

### 3 Chantier expérimental

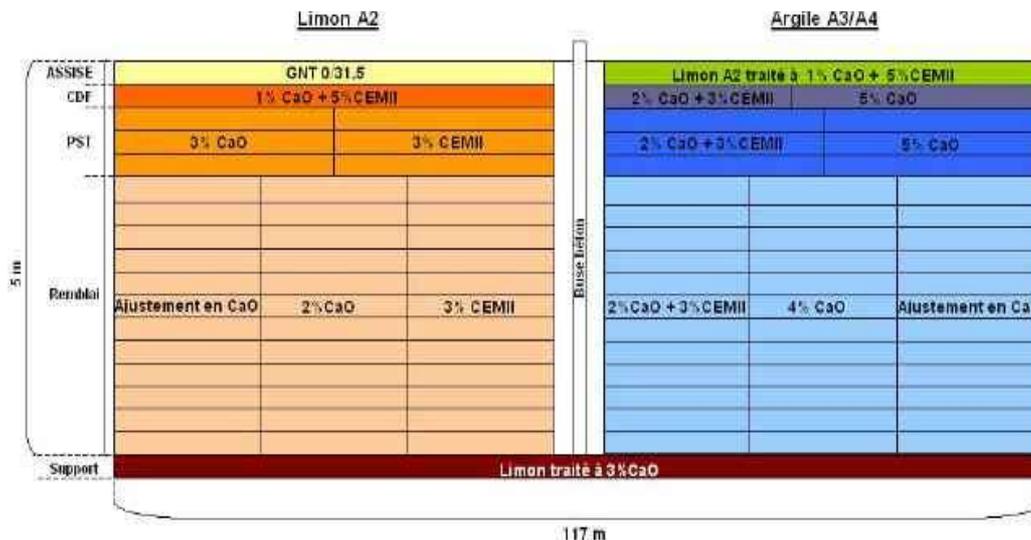


Figure 12 - Coupe longitudinale du remblai traité

#### 3.1 Description du remblai expérimental

La constitution du remblai en différents casiers est basée sur le principe d'une étude comparative entre argile A4 et limon A2. Le remblai expérimental (figure 12) d'une longueur de 117m est ainsi divisé en deux parties égales distinguant d'un côté les matériaux argileux et de l'autre les limons. Les différentes parties du remblai se distinguent entre le support de remblai, la base de remblai, le remblai, la partie supérieure des terrassements(PST), la CDF et l'assise. La hauteur totale est de 5 m. Chaque moitié de l'ouvrage est divisée en casiers dont le nombre varie en fonction de différentes

modalités de traitement prédéfinies par le groupe de travail en charge de la construction de l'ouvrage expérimental.

En corps de remblai, il a été choisi de tester pour les deux types de matériaux, 3 dosages différents : un dosage minimum en chaux ( inférieur à 1% correspondant à un simple ajustement), un dosage à la chaux seul et enfin un casier traité soit uniquement au ciment pour la partie limoneuse ou soit mixte chaux- ciment pour la partie argileuse.

En PST, le casier d'ajustement en chaux disparaît, le dosage en chaux seul est augmenté d'un point pour les deux types de matériaux.

En CDF, la partie limoneuse est composée d'une couche traitée chaux-ciment et pour la partie argileuse, les mêmes modalités de traitement qu'en PST sont maintenues.

Enfin, la couche d'assise en partie limoneuse est composée d'une couche de grave non traitée de granulométrie 0/31.5mm calcaire et pour la partie argileuse, l'assise est composée d'un limon dont les modalités de traitement sont identiques à la CDF de la partie limoneuse.

La base de l'ouvrage expérimental est fondée à environ un mètre sous le terrain naturel afin d'étudier le comportement du remblai en condition hydrique défavorable. Le pied de l'ouvrage subira donc des immersions saisonnières conséquentes du fait du battement de la nappe phréatique de la Lizaine.

En partie centrale, entre les deux types de matériaux a été placée une buse en béton ( $\varnothing$  1000mm) dont le but est de permettre le raccordement et la remontée de tous les câbles nécessaires aux capteurs mis en place lors de la construction dans différentes couches de l'ouvrage.

### 3.2 Instrumentation de l'ouvrage

L'emplacement des capteurs a été défini de manière symétrique de part et d'autre du remblai (matériaux A2 et A4). Un total de 144 capteurs a été placé dans l'ouvrage :

- ✓ 44 sondes de teneur en eau volumique avec mesure de température associée,
- ✓ 24 sondes de succion
- ✓ 8 tassomètres,
- ✓ 4 sondes de hauteur de nappe,
- ✓ 8 capteurs de déplacement,
- ✓ 10 sondes de température,
- ✓ 16 accéléromètres,
- ✓ 30 jauges de contrainte

L'objectif de cette instrumentation est l'étude du comportement dans le temps du remblai à travers différents paramètres. L'évolution hydrique de l'ouvrage est particulièrement étudiée grâce aux sondes de teneur en eau volumique. Les échanges avec l'atmosphère sont analysés grâce aux sondes de succion et de température. Les tassements sont mesurés en base de remblai à l'aide des tassomètres et des capteurs de déplacement. Les mouvements dus aux conditions hydriques défavorables de l'implantation du remblai pourront ainsi être observés. La hauteur de la nappe de la Lizaine est contrôlée par 4 sondes piézométriques. Il est prévu de solliciter l'ouvrage à la fatigue par un dispositif pouvant générer des chargements dynamiques à la surface. Le comportement à la fatigue sera mesuré grâce aux accéléromètres et aux jauges de contraintes. Un relevé rigoureux de l'emplacement de chaque capteur a été effectué par levé GPS. Une station météorologique est implantée au droit de l'ouvrage avec recueil des conditions pluviométriques et thermiques de la zone.

### 3.3 Réalisation de l'ouvrage expérimental et objectifs de densification

La réalisation de l'ouvrage expérimental a débuté à la mi-mars 2010 et a duré près d'un mois. Il s'agit d'une période de fin d'intempérie dans la région ce qui se traduit par des portances faibles au niveau du fond de fouille .

- *Préparation du support :*

Un décaissement d'un mètre sous le niveau du terrain naturel est effectué pour enterrer le remblai. Il a été décidé de traiter en place l'assise ainsi obtenue à 2%CaO sur 0.40m. Un apport de 0.40m de limon A2 pré-traité à 3%CaO a ensuite été effectué sur la totalité de la surface afin d'assurer un effet d'enclume permettant de garantir l'obtention de densités correctes pour la montée du remblai.

- *Traitement des matériaux :*

Les deux types de matériaux (A2 – figure 13 - et A4) sont traités au stock. Les matériaux ont été préparés préalablement à la réalisation du chantier. Le limon est traité directement sur le stock. Le stock d'argiles très plastiques est scarifié à la pelle mécanique (figure 14). Les mottes dont les dimensions peuvent atteindre 500mm sont déposées sur l'arase de la section courante afin d'être traitées sur un support de meilleure qualité.



Figure 13 - Traitement du limon au stock – épandage et malaxage



Figure 14 - Scarification des argiles sur la section courante de la RD438

La mise en œuvre est opérée casier par casier. La réalisation des couches du remblai, puis leur instrumentation alternent avec la préparation des matériaux traités au stock.

Les douze couches d'une épaisseur de 0.30m chacune composant le corps de remblai sont mises en oeuvre en recherchant l'objectif de densification "q4" en considérant  $p_{dm}^{(I)} \geq 95\%$   $p_{dOPN}^{(II)}$  et  $p_{dfc}^{(III)} \geq 92\%$   $p_{dOPN}$  conformément aux prescriptions du GTR.

Les 3 couches de la PST d'une épaisseur de 0.25m chacune adoptent les mêmes objectifs de densification que pour la partie corps de remblai.

L'objectif de densification de la CDF d'une épaisseur de 0.30m sur l'ensemble du remblai est plus exigeant puisqu'il doit viser la qualité "q3" ce qui se traduit par un  $p_{dm} \geq 98.5\%$   $p_{dOPN}$  et  $p_{dfc} \geq 96\%$   $p_{dOPN}$ .

La couche d'assise est divisée en deux parties de 0.25m d'épaisseur. Sur la partie en remblai argileux, une assise en limon traité a été densifiée de manière à atteindre un objectif "q2" à savoir  $p_{dm} \geq 97\%$   $p_{dOPM}^{(IV)}$  et  $p_{dfc} \geq 95\%$   $p_{dOPM}$ . Sur la partie en remblai limoneux, l'assise est composée d'une grave 0/31.5mm calcaire simulant une sous-couche ferroviaire. Elle a été densifiée pour atteindre l'objectif "q1" soit  $p_{dm} \geq 100\%$   $p_{dOPM}$  et  $p_{dfc} \geq 98\%$   $p_{dOPM}$  sur 0.25m d'épais.

Les masses volumiques des différentes couches ont été mesurées au gamma-densimètre à profondeur variable (GPV25/40). Un relevé topographique précis a été réalisé par un géomètre sur l'ensemble du remblai, casier par casier et couche par couche afin de contrôler l'épaisseur de chaque couche mise en oeuvre.

### 3.4 Techniques de mise en œuvre et élaboration d'une méthodologie

Enchaîner le traitement des matériaux dans la zone de stockage, leur acheminement et leur mise en œuvre au niveau du remblai ont demandé une organisation et un contrôle constant des différentes phases. Un cahier des charges [7] rédigé au préalable a permis d'agencer clairement chaque étape de l'édification du remblai. Deux épandeurs ont assuré l'épandage des liants (un Caterpillar 2003 pour la chaux (figure 15) et un Rabaud AKERA pour le ciment) afin de permettre les cadences exigées par le déroulement de la réalisation du remblai. Ils ont été réglés par des essais de contrôle à la bêche en début de chantier en fonction des dosages définis préalablement. Le traitement du limon est réalisé au stock. La butte limoneuse est divisée en deux à partir du sommet. La répartition est faite en fonction des deux modalités de traitement déterminées en corps de remblai. Un côté est destiné au traitement à la chaux seule et l'autre au ciment. La surface de traitement est estimée en fonction du volume de chaque casier à mettre en œuvre. Le malaxage est effectué au pulvérisateur de sols HAMM RACO 550. L'arrosage est assurée par une arroseuse à queue de carpe (figure 16).



Figure 15 - Epandage de la chaux sur l'argile



Figure 16 - Arrosage de l'argile

Le traitement de l'argile très plastique est réalisé après étalement des mottes argileuses de dimension 0/500mm sur l'arase de la section courante bordant le stock argileux. Le traitement est réalisé dans un premier temps suivant cet enchaînement :

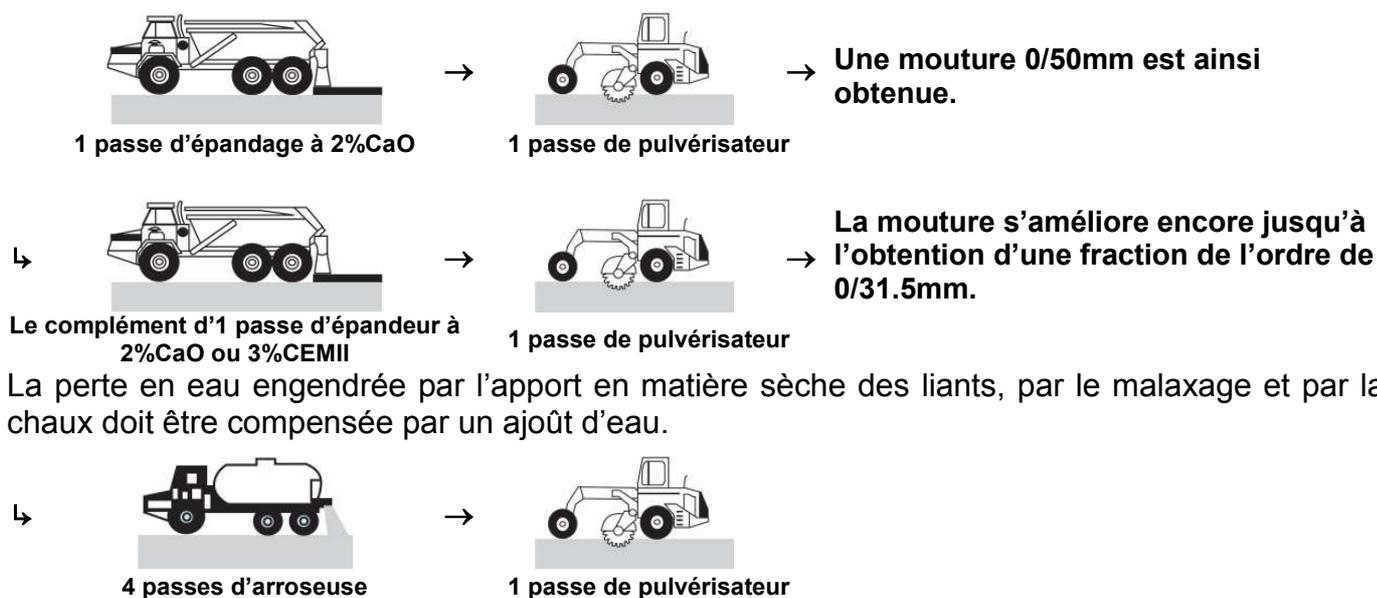


Figure 17 - Techniques d'exécution avant calage de la méthodologie

En suivant cette méthodologie, l'argile traitée présente un aspect poudreux et sec lors de sa mise en œuvre en remblai ; générant des phénomènes de feuillette lors du compactage du casier sont avérés. Un changement de méthode est alors préconisé suivant la figure 16, permettant d'augmenter la phase d'humidification.

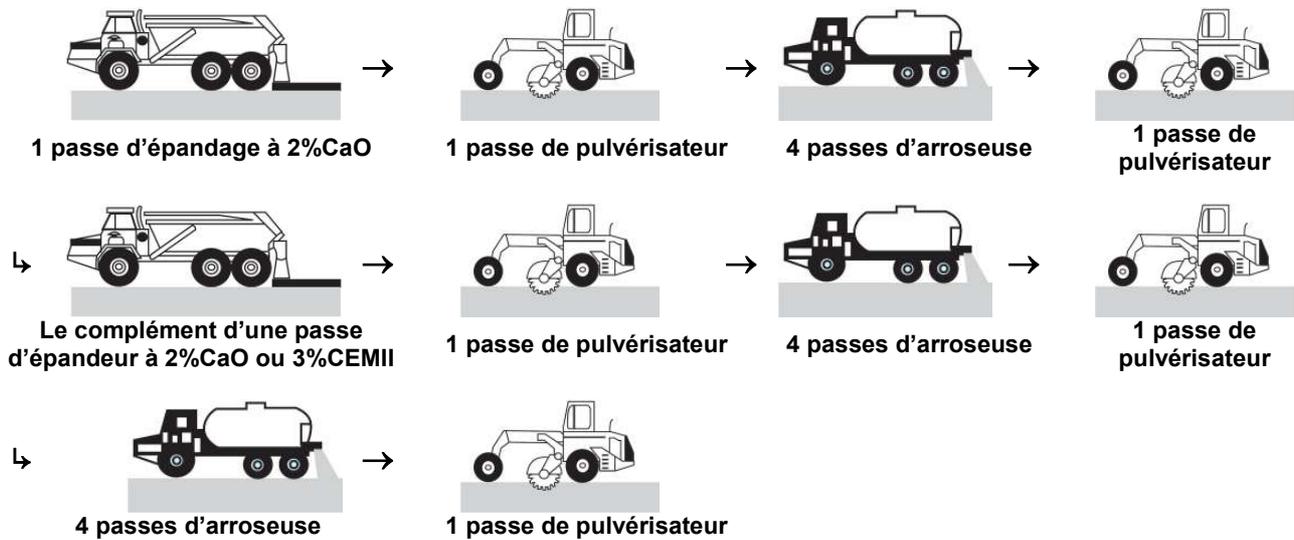


Figure 18 - Méthodologie de techniques d'exécution retenue

Une mouture fine et d'état hydrique correct est ainsi obtenue. Cela se traduit lors du compactage par une amélioration de la densification des couches traitées.

Cette méthodologie montre que **l'hydratation de l'argile doit être abondante et systématiquement couplée avec un malaxage approprié au pulvérisateur de sol** entre chaque étape d'épandage de liant. L'objectif de l'hydratation est d'atteindre des teneurs en eau supérieures aux références WOPN obtenues en laboratoire. D'après des études récentes (LASLEDJ Abdelmadjid, 2009 [8]), l'incorporation de l'eau peut se faire après chaulage. La chaux même éteinte garde son efficacité en terme de floculation des argiles. Une hydratation importante augmente le délai de maniabilité et favorise la migration de la chaux dans la matrice argileuse dans le cas d'un traitement mixte. L'idéal aurait été de réaliser le traitement à la chaux et l'ajustement en eau quelques semaines (voir quelques mois) avant le traitement au liant hydraulique.

Un contrôle des teneurs en eau est effectué sur chaque casier traité. (environ 350 prélèvements).



Figure 19 - Mouture 0/31.5mm obtenue sur l'argile



Figure 20 - Compactage au VP5

La finesse de la mouture associée à une hydratation intense améliore les effets du compactage et augmente les qualités de la couche traitée. Une opération de malaxage

doit compléter chaque phase d'hydratation et d'épandage. Une mouture de l'ordre de 0/20mm a été obtenue sur le limon traité et une mouture de 0/31.5mm sur l'argile traitée (Figure 19).

Le ciment utilisé (CEMII 42.5LL) est un ciment normalisé à prise rapide. Afin de tenir compte du délai de maniabilité du ciment, un laps de temps de 2 à 4h a été respecté entre le moment où le liant a été mis en contact avec le matériau à traiter et le compactage final du casier.

Tableau 14 - Modalités de compactage

	LIMON				ARGILE			
	Epaisseur (m)	compacteur	Nbre de passes	Vitesse (km/h)	Epaisseur (m)	compacteur	Nbre de passes	Vitesse (km/h)
<b>Assise GNT 0/31.5 côté LIMON (1couche)</b>	<b>0,25</b>	<b>VM5</b>	<b>10</b>	<b>2</b>				
<b>Assise Limon traité côté argile (1couche)</b>					<b>0,25</b>	<b>VM5</b>	<b>16</b>	<b>2</b>
<b>CDF (1 couche)</b>	<b>0,30</b>	<b>VM5</b>	<b>8</b>	<b>2</b>	<b>0,30</b>	<b>VM5</b>	<b>16</b>	<b>2</b>
<b>PST (3 couches)</b>	<b>0,30</b>	<b>VM5</b>	<b>4</b>	<b>3</b>	<b>0,30</b>	<b>VM5</b>	<b>8</b>	<b>3</b>
<b>Remblai (12 couches)</b>	<b>0,30</b>	<b>VP5</b>	<b>4</b>	<b>3</b>	<b>0,30</b>	<b>VP5</b>	<b>8</b>	<b>3</b>

Les modalités de compactages ont suivi les exigences préconisées par le GTR pour la partie limoneuse. Deux compacteurs ont été mis à disposition par l'entreprise ; un compacteur vibrant monocylindre lisse de classe VM5 (Bomag BW 219 DH-3) et un compacteur vibrant à pieds dameurs de classe VP5 (Hamm 3520 HT) (figure 20). De faibles phénomènes de « feuillette » ont été observés lors de la réalisation des premiers casiers avant la mise en place d'une d'hydratation plus intensive. Le phénomène de « matelassage » a été très rarement observé.

Des mesures de portance à court terme ont été effectuées entre 6 à 8h après la mise en oeuvre. Sur la PST, les mesures réalisées à la Dynaplaque 1 ont permis de vérifier des portances supérieures ou égales à 50MPa. L'objectif AR2 est atteint sauf pour le casier en limon traité à 3%CaO où les modules avoisinaient les 30MPa. Sur la CDF, les portances mesurées à la Dynaplaque 2 ont permis de vérifier l'obtention d'une plate-forme de classe PF2 (65 MPa pour les matériaux argileux traités à 5% CaO, 69 MPa pour les matériaux argileux traités à 2% CaO + 3% CEMII et 90 MPa pour le limon traité à 1% CaO + 5% CEMII).

Un enduit bicouche gravillonné a été réalisé sur l'assise en limon traité afin de la protéger superficiellement contre les phénomènes d'évaporation et donc de dessiccation. Le même enduit a été répandu avant la mise en oeuvre de l'assise en GNT 0/31.5mm.

## 4 Conclusion et perspectives

Le traitement des argiles A4 a donné des résultats plutôt satisfaisants tant en phase laboratoire qu'en phase chantier pour ce qui concerne la mise en oeuvre en remblai et dans l'attente des résultats du suivi à long terme de l'ouvrage. Il se doit cependant d'être signalé qu'à la date actuelle (en attente des résultats de laboratoire aux plus longs termes) les critères relatifs à l'obtention d'une insensibilité au gel ( $R_c > 2.5$  Mpa) ne sont pas atteints, ce qui interdit en l'état toute possibilité d'utilisation de ces matériaux en couche de

forme. Le traitement des argiles à la chaux les rend plus pulvérulentes et donc plus faciles à travailler, ce qui permet l'obtention d'une mouture de taille plus que correcte pour ce type de matériaux (0/31.5 mm constatés). Les résultats de laboratoire montrent que l'argile traitée aux modalités retenues peut être réutilisée en corps de remblai. Les critères d'immersion au jeune âge sont validés. Dans le diagramme Rt/E du GTS [5], la zone 5 est atteinte à 90j de cure pour une argile traitée à 2%CaO+3%CEMII. Les conditions de mise en œuvre en chantier étaient bonnes et notamment favorisées par une météo clémente sans intempéries mais également sans assèchement important (et probablement problématique dans le cas des matériaux très argileux compte tenu des apports en eaux très conséquents qui ont dûs être réalisés). L'énergie déployée par les engins de chantier s'est révélée être importante pour traiter les matériaux argileux. Ces derniers ont en effet nécessité au total 12 passes d'arroseuse et 5 passes de pulvérisateur. Il a pu être démontré que les techniques d'exécution actuelles permettent de traiter les argiles in situ. Une intense hydratation des matériaux est nécessaire pour atteindre la teneur en eau garante d'une bonne densification des couches traitées. Les phases d'arrosage et d'épandage doivent chacune être systématiquement suivies d'une phase de malaxage afin d'obtenir une qualité de mélange satisfaisante.

L'étude de l'impact environnemental et économique d'un tel chantier est en cours d'étude et fait l'objet d'un axe de recherche du projet TerDOUEST menées dans le cadre de ce projet. Les études physico-chimiques sur les effets du traitement sur les argiles plastiques sont en cours afin d'apporter une meilleure compréhension des phénomènes qui agissent sur la durabilité d'un traitement.

## RÉFÉRENCES

1. LCPC - SETRA (1992). Guide Technique de « Réalisation des remblais et des couches de forme ». Fascicules I et II
2. A. Le Roux (1969). Traitements des sols argileux par la chaux. BLPC n°40. p59 à 96
3. M. Scaeffner et M. Causero (1974). Utilisation des marnes du Keuper en terrassement – Chantier expérimental de traitement à la chaux. BLPC n° 71. p45 à 64
4. C. Cimpelli et M. Kergoët (1974). Utilisation en couche de forme des argiles vertes de Romainville traitées à la chaux et au ciment. BLPC n°73. p9 à 15
5. Guide Technique de traitement des Sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques LCPC-SETRA (2000).
6. V. Berche, P. Jeanjean, P. Rossigny, V. Ferber et A. Quibel (2009). Réutilisation d'argiles très plastiques en corps de remblais routiers : expérimentation sur le chantier de l'autoroute A34 (Charleville-Réthel). BLPC n°274. p31 à 46
7. M. Froumentin (Août 2009) Cahier des charges de réalisation de l'ouvrage expérimental TerDOUEST dans le cadre du chantier de la RD438 d'Héricourt
8. LASLEDJ Abdelmadjid (2009) Traitement des sols argileux à la chaux : processus physico-chimique et propriétés géotechniques. Thèse de l'université d'Orléans

### Abréviations et définitions

- (I) pdm : masse volumique apparente sèche « moyenne »
- (II) pdOPN : masse volumique apparente sèche à l'Optimum Proctor Naturel
- (III) pdfdc : masse volumique apparente sèche « fond de couche »
- (IV) pdOPM : masse volumique apparente sèche à l'Optimum Proctor Modifié