



HAL
open science

La construction d'un remblai expérimental unique en France en sols fins traités hors spécification

Michel Froumentin, Yasmina Boussafir

► **To cite this version:**

Michel Froumentin, Yasmina Boussafir. La construction d'un remblai expérimental unique en France en sols fins traités hors spécification. Colloque TerDOUEST 2013, Jun 2013, MARNE LA VALLEE, France. 13p. ⟨hal-01205504⟩

HAL Id: hal-01205504

<https://hal.science/hal-01205504v1>

Submitted on 25 Sep 2015

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



HAL Authorization

LA CONSTRUCTION D'UN REMBLAI EXPERIMENTAL UNIQUE EN FRANCE EN SOLS FINS TRAITES HORS SPECIFICATION

THE CONSTRUCTION OF AN EXPERIMENTAL EMBANKMENT WITH AN UNCONVENTIONAL SOIL

M. FROUMENTIN¹, Y. BOUSSAFIR²

¹CETE Normandie- Centre, Centre d'Expérimentation et de Recherche, France

² IFSTTAR Département GERS, France

RÉSUMÉ – Cet article présente la construction d'un remblai expérimental unique en France réalisé avec deux types de sols (limon et argile) traités à la chaux et/ou au ciment dans le cadre du projet national ANR TerDOUEST (2008-2012). Des mesures réalisées pendant la mise en œuvre ont permis de caractériser l'ouvrage. Une instrumentation et une télésurveillance, intégrée lors de la construction, permettent de suivre dans le temps les paramètres caractéristiques de cet ouvrage de référence.

Mots-clés : traitement de sols, terrassement, limon, argile, comportement, instrumentation.

ABSTRACT – This paper presents the construction of an experimental embankment built with two types of soil (silt and clay) treated with lime and/or cement in the project TerDOUEST. Measurements made during construction were used to characterize the structure. Instrumentation, integrated in the structure, provides the monitoring over time of the characteristic parameters of this reference embankment.

Keywords: soil treatment, earthworks, soils, clay, behaviour, instrumentation.

1. Introduction

Un des principaux objectifs du projet national ANR TerDOUEST est de déterminer les conditions d'emploi de sols non valorisables en l'état et d'en apprécier le risque. Actuellement 20 à 60% des sols rencontrés dans l'emprise des chantiers de terrassement ne sont pas valorisables, ce qui a pour conséquence leur mise en dépôt et le recours à des apports extérieurs. La profession s'est fixé comme objectif à l'horizon 2020 de réemployer ou valoriser 100% des matériaux excavés sur les chantiers. La construction de l'ouvrage expérimental entreprise dans le projet TerDOUEST et décrite dans cet article permettra de confronter les résultats issus d'études menées en laboratoire à des données réelles obtenues lors de la réalisation et du suivi sur plusieurs années d'un remblai construit dans des conditions réelles et soumis à des sollicitations climatiques et mécaniques.

Les principes de conception sur lesquels a été accepté le projet TERDOUEST sont les suivants :

- réaliser l'ouvrage dans le cadre d'un projet d'infrastructure et non pas d'une expérimentation isolée, de manière à se placer dans les conditions les plus réalistes possibles,
- construire l'ouvrage dans une emprise n'affectant pas l'infrastructure en service,
- utiliser deux types de sols dans le remblai : un sol conventionnel (matériau régulièrement utilisé dans des corps de remblais traités) et un matériau hors spécification (argile très plastique) dont l'utilisation est jusqu'à présent proscrite, y compris après traitement,
- implanter le remblai dans une zone inondable pour que la base du remblai soit soumise à des sollicitations hydriques fortes,
- apporter une part prépondérante de réponses à court et moyen terme en méthodes et techniques de mise en œuvre,
- inclure la possibilité d'un suivi à long terme (y compris au-delà de la durée du projet).

2. Description de l'ouvrage expérimental

2.1. Implantation

Le remblai expérimental a été construit dans le cadre de la mise à 2x2 voies de la RD438 à Héricourt (70). Ce chantier a permis de répondre aux principes de conception recherchés dans le projet TerDOUEST, en particulier sur l'utilisation de limons de classe A2 suivant NF P 11-300 qui constituent des sols régulièrement utilisés en terrassements et une argile de classe A3/A4 très plastiques qui constitue le matériau hors spécification. Pour la construction de l'ouvrage il a été décidé d'utiliser le bassin de retenue des eaux de ruissellement B16 (PK 12600 à 12690) à proximité de l'ouvrage d'art OA15 (Figure 1). L'ouvrage expérimental correspond à la construction du remblai aval du bassin, le remblai amont venant s'adosser au remblai routier de la section courante. Le pied du remblai expérimental est situé en zone inondable au sein de la zone d'expansion de crues du cours d'eau " La Lizaine" dont le passage est situé à l'OA15.



Figure 1 : Photographie aérienne du remblai expérimental (source Via Michelin mars 2013)

2.1. Contexte de la construction de l'ouvrage

Afin de s'assurer que le pied du remblai soit soumis à des venues d'eau, l'ouvrage a été encaissé d'1 m dans le terrain naturel constitué d'argiles sableuses. La nappe est présente à une profondeur d'environ 2 m au printemps et est affleurante en hiver. Le remblai est divisé en deux parties dans sa dimension longitudinale et construit pour chaque moitié avec chaque classe de sol (limon et argile). La largeur en pied de remblai est de 25 m et de 5 m en tête. Les pentes des talus sont égales à 2H/1V. La longueur totale développée de l'ouvrage est de 107 m et les cubatures sont de 5280 m³ pour le limon et 4710 m³ pour l'argile.

Chaque moitié de l'ouvrage comporte les 4 parties suivantes :

- le corps de remblai (y compris la base en zone inondable) constitué de 12 couches unitaires,
- la partie supérieure des terrassements (PST) constituée de 3 couches unitaires,
- une couche de forme (CDF),
- une couche d'assise.

L'utilisation de chaque sol (limon ou argile) concerne la construction des parties remblai, PST et CDF. La partie intérieure du bassin a été remblayée en argile A3 sans traitement au fur et à mesure de la construction des 12 couches de remblai. En fin de construction, cette partie du bassin a été terrassée afin de lui donner sa géométrie finale. Pour les deux sols utilisés, les différentes modalités de traitement retenues sont données Figure 2.

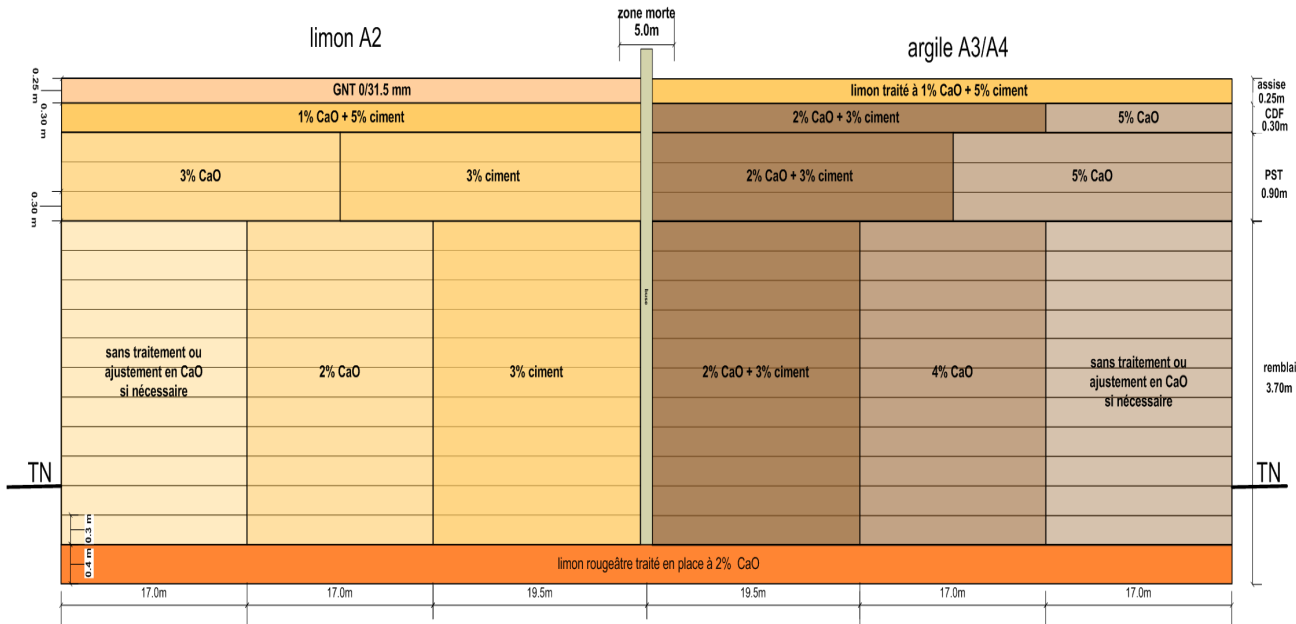


Figure 2: modalités de traitement réalisées

3. Etude de traitement

Au préalable à la réalisation du chantier, les essais de laboratoire classiques dont la synthèse est donnée Tableau 1 ont été réalisés avec les différentes modalités de traitement sur les deux sols.

Tableau 1 : résultats des essais de laboratoire

Paramètre	Ref. GTS	ESSAI	CURE	unité	LIMON A2						ARGILE A4						
					naturel	1% CaO	2% CaO	3% CaO	3% CEMII	1% CaO + 3% CEMII	1% CaO + 5% CEMII	naturel	2% CaO	5% CaO	2% CaO + 3% CEMII	2% CaO + 5% CEMII	
Références de compactage		WOPN		%	17.9	18.8	20.3	20.9	17.7	18.7	17.5	26.4	32.5	40.0	32.5	31.0	
		pdOPN		g/cm3	1.760	1.720	1.680	1.640	1.760	1.710	1.710	1.500	1.338	1.197	1.338	1.370	
		IP	immédiat	%	16	23	25	30	23	27	28	9	12	14	15	21	
Perf. Méca.	P106 §3.6.1	CBRI	4 jours	%		33	52	65	73	140	188			18	51	64	
		CBRI/IP		%		1.43	2.08	2.17	3.17	5.19	6.71			1.29	3.40	3.05	
aptitude	P97 §2.1	Gv φ5H5 98.5% OPN (traitement CaO)	3 air + 7 eau	%		0.3	0.3	0.0					0.92	2.49			
Maniabilité		obtention 98% OPN	i, 1, 3, 5, 7 heures	mn					80	240	80				50	70	
Comp. Gel (CaO)	P106 §3.6.1	Rc φ5H10 98.5% OPN	7	MPa		0.38	0.69	0.69					non réalisé	non réalisé			
aptitude	P97 §2.1 P108 TAB C1-IX	Gv et Rtb φ5H5 96% OPN (traitement CEM ou mixte)	2 Dm + 7 j	%					5.16% 0.07 MPa	0.59% 0.23 MPa	0.70% 0.41 MPa				8.2% 0.16 MPa	10.21% 0.21 MPa	
Age autorisant circulation et résistance à l'immersion au jeune âge	P108 TAB C1-IX	Rc φ5H10 98.5% OPN	MPa	2					1.04	1.45	1.62						
				4					0.91	1.90	1.98						
				7					1.05	1.73	2.35			0.27	0.78	0.92	
				28					1.13	2.15	2.96			0.61	0.35	1.17	1.16
				14 + 14					0.68	1.71	2.27			cassées suite immersion	0.03	0.08	non réalisé
				60					1.25	2.40	3.28			0.62	0.37	1.27	1.33
				28 + 32					0.69	1.65	2.46					0.98	1.50
				90					1.43	2.57	3.87				0.55	1.34	1.76
				28 + 62					0.98	1.56	2.65					1.38	1.59
				120					1.77	2.84	3.99				0.58	1.36	2.20
28 + 92					0.75	1.59	2.83					1.36	1.58				
partie basse de remblai	P84 TAB B-VIII	Rc φ5H10 96% OPN	MPa	14 + 14		0.20	0.54	0.51					0.26	0.31	0.80	0.92	
				28 + 32		0.23	0.56	0.77					0.27	0.39	0.67	1.09	
Résistance au gel et performances à long terme	P108 TAB C1-IX	E / Rtb φ5H5 96% OPN	MPa	7					1788/0.11	2362/0.23	2464/0.31				347/0.08	1043/0.10	
				28					7880/0.28	4166/0.22	4500/0.14				1916/0.13	1727/0.08	
				90					2546/0.40	3646/0.30	1368/0.18				1309/0.14	2607/0.22	
				180					4424/0.37	2755/0.31	1668/0.17				650/0.22	1403/0.24	
				360					1448/0.19	3350/0.39	4835/0.60				1474/0.19	727/0.22	

essai non prévu

A partir de ces résultats, les performances mécaniques obtenues ont permis d'établir les critères de jugement pour les différentes modalités de traitement dans le cas d'une utilisation en remblai (Tableau 2) et en couche de forme (Tableau 3). Ces critères de jugement sont ceux définis dans le Guide Technique sur le Traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques LCPC-SETRA.

Tableau 2 : résultats des essais de laboratoire pour une utilisation en remblai

Utilisation	Critère d'évaluation	Conclusions de l'étude
base de remblai inondable	Résistance à la compression : $R_c \geq 0.5 \text{ MPa}$ après 14 j de cure + 14 j d'immersion	pour l'ensemble des cas étudiés, un minimum de 2% de chaux est nécessaire pour une utilisation du limon et un traitement mixte chaux + ciment est nécessaire pour l'utilisation de l'argile en base de remblai inondable
corps de remblai	Indice portant immédiat : IPI > 6	l'ensemble des cas étudiés pour les deux types de sols satisfait au critère pour une utilisation en corps de remblai
partie supérieure des terrassements	ICBR (4 j d'immersion) / IPI ≥ 1	l'ensemble des cas étudiés pour les deux types de sols satisfait au critère pour une utilisation en partie supérieure des terrassements avec un minimum de 5% de CaO pour l'argile

Tableau 3 : résultats des essais de laboratoire pour une utilisation en couche de forme

Utilisation	Exigences	Critère d'évaluation	Conclusions de l'étude
couche de forme avec traitement à la chaux seule	comportement sous trafic	$I_{CBR} (4j) \geq 20$ et $I_{CBR} (4 j) / IPI \geq 1$	pour les différentes modalités avec le limon, on atteint les performances visées. Pour l'argile un traitement à la chaux seule, même avec 5% de teneur massique, ne conduit pas à des résultats satisfaisants. Pour ce type de sol, avec un traitement mixte avec 2% CaO + 3% CEM II ou 2% CaO + 5% CEM II les performances sont atteintes.
	comportement au gel	$R_c \geq 2.5 \text{ MPa}$	les résistances mécaniques obtenues ne satisfont pas au critère de comportement au gel.
couche de forme avec traitement à la chaux et au ciment	âge autorisant la circulation sur la couche de forme	$R_c \geq 1 \text{ MPa}$	pour le limon, le rétablissement du trafic au jeune âge est permis après 7 jours de cure, même si les résultats obtenus après deux jours sont légèrement supérieurs au seuil de 1 MPa. Pour les deux modalités de traitement mixte, on obtient environ 1.5 MPa dès 2 jours de prise. Pour l'argile A4, il faut attendre 28 jours pour atteindre le seuil de 1 MPa et on ne note pas de différence significative entre les deux dosages en ciment jusqu'à une cure de 60 jours. Après 90 jours, les deux modalités se différencient nettement
	Résistance à l'immersion au jeune âge :	$R_{ci} (28j \text{ cure} + 32j \text{ immersion}) : R_{ci} / R_{c60j \text{ cure}} \geq 0.60$	à l'exception de la modalité à 3% de CEMII pour le limon A2, les résultats obtenus montrent que le critère d'évaluation est validé pour l'ensemble des traitements mixte chaux et ciment, ce qui permet une immersion au jeune âge sans dégradation durable des effets du traitement
	comportement au gel	Résistance à la traction : $R_{tb} > 0.25 \text{ MPa}$	pour le limon le critère est satisfait à 28 jours dans le cas du traitement au ciment seul. On note cependant une baisse de la résistance à long terme ($R_{tb} = 0.18 \text{ MPa}$ à 360 jours) ; ce point serait à confirmer. Pour le cas du traitement mixte à 1% CaO + 3% CEM II, le critère est atteint entre 28 et 90 jours de cure. La résistance se conserve à long terme ($R_{tb} = 0.39 \text{ MPa}$ à 360 jours). Dans le cas du traitement à 1% CaO + 5% CEM II, la résistance est atteinte dès 7 jours ($R_{tb} = 0.32 \text{ MPa}$) puis diminue (en moyenne égale à 0.20 MPa) entre 28 et 180 jours. A long terme la résistance obtenue est de 0.60 MPa. Ce comportement demanderait à être également confirmé.

Pour les performances escomptables à long terme, le critère d'évaluation est fait à partir des couples de paramètres E/R_t (module/Résistance à la traction) après 90 jours de cure, avec l'obtention au minimum d'une classe mécanique de niveau 5. Les résultats obtenus (pour l'ensemble des cures ayant fait l'objet

d'essais à partir de 7 jours) sont donnés Tableau 4. Dans le cas du limon, à 90 jours, le traitement au ciment seul conduit à l'obtention de la classe mécanique 3. Les traitements mixtes (1% CaO + 3% CEM II et 1% CaO + 5% CEM II) conduisent à des classes 5. A long terme, on note une dégradation des caractéristiques du limon traité au ciment (classe mécanique 5 à 360 jours), alors que pour les cas de traitement mixtes, les classes atteintes sont respectivement 4 et 3. Dans le cas de l'argile les caractéristiques mécaniques restent faibles (au mieux classe 4 ou 5) avec des niveaux de modules inférieurs à 1000 MPa dans certains cas.

Tableau 4 : performances mécaniques obtenues

Cure (jours)	limon A2			argile A4	
	3% CEM II	1% CaO + 3% CEM II	1% CaO + 5% CEM II	2% CaO + 3% CEM II	2% CaO + 5% CEM II
	classe	classe	classe	classe	classe
7	hors zone	classe 5	classe 4	hors zone	hors zone
28	hors zone	hors zone	hors zone	hors zone	hors zone
90	classe 3	classe 5	classe 5	hors zone	classe 5
180	classe 4	classe 4	hors zone	E < 1000 MPa	classe 4
360	classe 5	classe 4	classe 3	classe 5	E < 1000 MPa

4. Mise en œuvre du remblai

4.1. Moyens utilisés

Pour le traitement des sols et la mise en œuvre les matériels utilisés sont: 2 silos de stockage pour pulvérulents (chaux et ciment), 2 épandeurs (Akeria et Panien), 1 arroseuse à queue de carpe (Pichon), 1 stabilisateur de sol (Raco 550), 3 pelles (Volvo EC210C, Daewo 225 LCV et Hitachi 210 LC), 4 dumpers (Volvo A30D 17.5 m³), 1 niveleuse (Caterpillar), 3 compacteurs (Hamm 3520 à pieds et 2 Bomag BW 219 DH3 à cylindre lisse). La fourniture et la livraison des liants nécessaires aux différentes modalités de traitement ont été prises en charge par les deux fournisseurs Lhoist pour la chaux (320 tonnes), et Cimbéton pour le ciment (162 tonnes). Pour l'instrumentation de l'ouvrage 140 capteurs ont été implantés dans l'ouvrage, 2200 mesures nivellement ont été réalisées ainsi que 130 mesures de masse volumique en place et 350 prélèvements de sol.

4.2. Ateliers de traitement des sols

Les matériels d'épandage ont fait l'objet d'un contrôle à la bêche au préalable du chantier pour vérifier leurs réglages. Les teneurs en eau visées des mélanges après traitement sont les teneurs en eau optimales définies dans le cadre des études de laboratoire (Tableau 5).

Tableau 5 : teneurs en eau visées à la mise en œuvre

sol	remblai		PST		couche de forme		assise	
	traitement	W _{OPN} (%)	traitement	W _{OPN} (%)	traitement	W _{OPN} (%)	traitement	W _{OPN} (%)
A2	3% CEM II	17.7	3% CEM II	17.7	1% CaO + 5% CEM II	17.5	GNT 0/31.5	6.2 (W _{OPM})
	2% CaO	20.3						
	sans	17.9	3% CaO	20.9				
A4	2% CaO + 3% CEM II	32.5	2% CaO + 3% CEM II	32.5	2% CaO + 3% CEM II	32.5	limon A2 1% CaO + 5% CEM II	17.5
	4% CaO	37.5 (estimé)	5% CaO	40.0	5% CaO	40.0		
	sans	26.4						

4.2.1. Traitement du limon

Le traitement du limon est réalisé classiquement au stock qui est divisé en deux parties, l'une réservée au traitement à la chaux seule et l'autre au ciment. La profondeur de malaxage est de 0.40 m. Les

photographies de la Figure 3 illustrent l'atelier de traitement du limon. La mouture obtenue après traitement est d'environ 0/20 mm.



Figure 3 : atelier de traitement du limon

4.2.2 Traitement de l'argile

Le traitement de l'argile n'est pas effectué directement sur le stock pour des raisons évidentes de traficabilité des engins. La quantité nécessaire d'argile à la mise en œuvre d'un casier est étalée sur la section courante du chantier le long du stock sur une épaisseur d'environ 0.50 m. Cette opération est réalisée à la pelle qui dépose sur la section courante l'argile formée de blocs compacts de taille pouvant aller jusqu'à une dimension d'environ 0.80 m par endroits. Sur cette surface les opérations d'épandage, malaxage et d'ajout d'eau sont ensuite réalisées. Dans un premier temps, les 6 étapes de la méthodologie de traitement retenue sont décrites par la Figure 4.

Avec cette méthodologie, la mouture obtenue après la première phase de malaxage (étape 2) est de 0/50 mm et passe à environ 0/31.5 mm après la deuxième phase de malaxage (étape 4). Les premiers traitements réalisés avec cette méthode ont montré que la teneur en eau obtenue était trop faible (phénomène essentiellement dû à la perte en eau par l'apport de matière sèche des liants). La mise en œuvre du mélange trop sec ne permet pas d'une part, d'obtenir l'objectif de densification visé en raison de la difficulté de compactage et, d'autre part, fait apparaître le phénomène de feuilletage pendant l'opération de compactage. La mise au point d'une seconde méthodologie de traitement, en intégrant un ajout d'eau beaucoup plus important (12 passes d'arroseuse), a donc été nécessaire. Elle est représentée Figure 4.

Les teneurs en eau obtenues avec cette seconde méthodologie sont proches de celles visées et le phénomène de feuilletage au moment du compactage disparaît. L'hydratation importante de l'argile doit être accompagnée après chaque ajout d'eau (4 passes d'arroseuse) par un malaxage du mélange. Le fait d'apporter une quantité importante d'eau ne modifie pas l'action de la chaux (qui garde son efficacité en terme de floculation même sous forme éteinte). Pour le compactage une teneur en eau élevée (de l'ordre ou légèrement supérieur à WOPN) est indispensable pour garantir le délai de maniabilité du mélange. La mouture obtenue en fin de l'opération de traitement est de l'ordre de 0/31.5 mm. Après traitement le mélange est repris et chargé à la pelle dans les dumpers, ce qui peut conduire à la formation d'agglomérats d'argile. Dans ce cas, la mouture du matériau déversé sur le lieu de mise en œuvre s'avère moins bonne que celle observée juste après le dernier malaxage. Une reprise et un réglage à la pelle sur le lieu de mise en œuvre pallient en partie cet inconvénient. Les photographies de la Figure 5 illustrent les opérations de traitement réalisées sur l'argile.

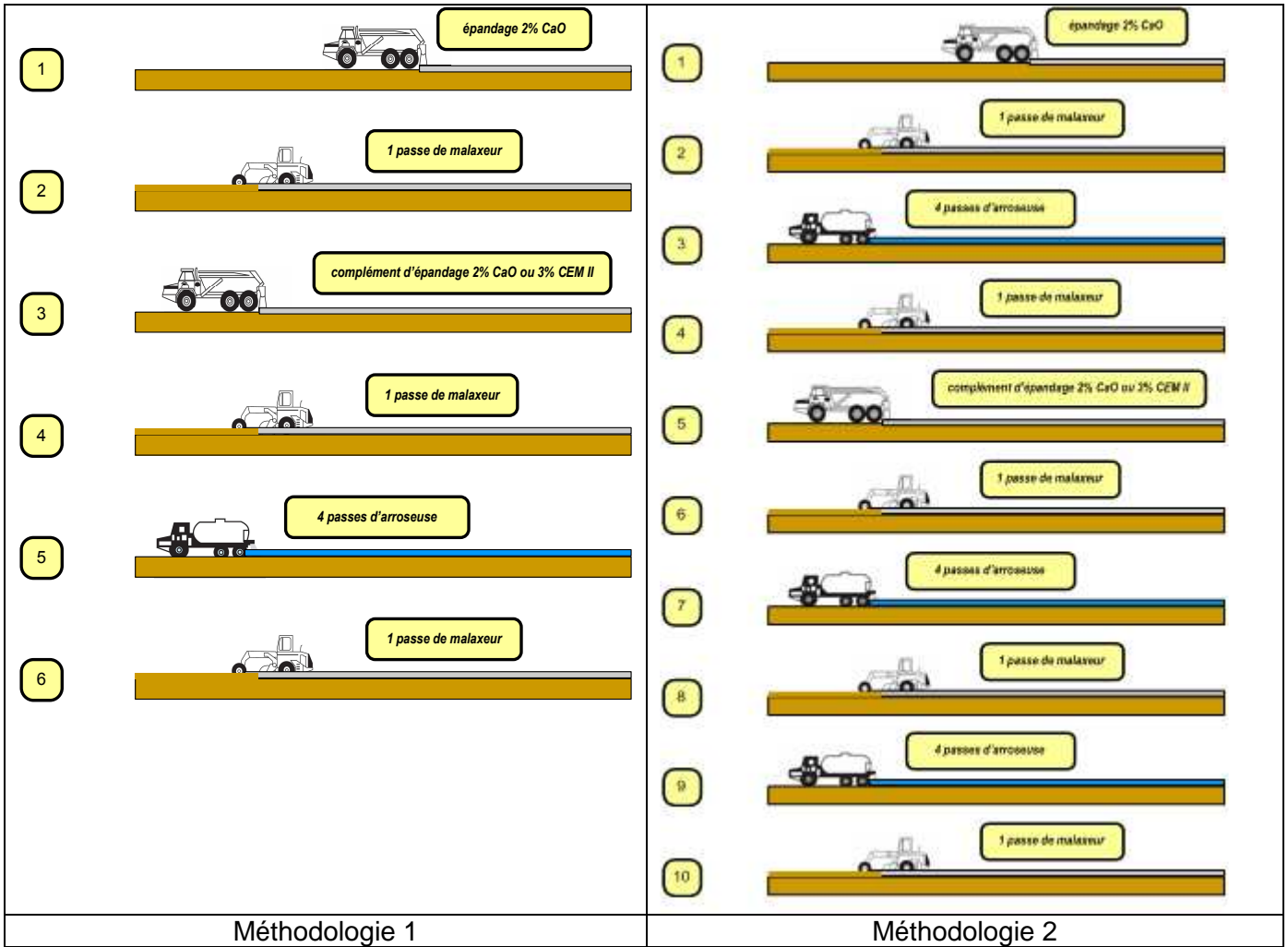


Figure 4 : méthodologies de traitement de l'argile



mise en couche de l'argile avant traitement



épandage de la chaux sur l'argile



malaxage de l'argile traitée à la chaux



mouture obtenue en fin d'opération de traitement

Figure 5 : atelier de traitement de l'argile

4.3. Atelier de mise en œuvre et de compactage

4.3.1. Base du remblai

Après un terrassement sur une profondeur d'1 mètre à l'emplacement du futur remblai expérimental et afin d'assurer les portances nécessaires à l'édification du remblai, il a été décidé de réaliser un traitement en place à 2% CaO du fond de bassin sur une profondeur de 0,40 m qui est constitué d'un limon rouge d'état hydrique très humide. Sur la totalité de la surface du fond de bassin ainsi traité et réglé, une première couche de limon A2 traité au stock à 3% de CaO a été approvisionnée sur 0,40m (Figure 6). Cette première couche a été compactée avec 4 passes de VM5 à 2,5 km/h, réglée à la niveleuse, puis un compactage final assuré au moyen de 2 passes supplémentaires de VM5 à la même vitesse. Le rôle de cette première couche réalisée sur toute l'emprise du remblai sert de couche support afin d'assurer l'effet d'enclume nécessaire pour garantir une portance suffisante en base de remblai et le compactage des couches sus-jacentes.



Figure 6 : mise en œuvre de la première couche de remblai sur toute l'emprise de l'ouvrage

4.3.2. Corps de remblai, PST, couche de forme et assise

Après traitement les sols traités sont transportés par dumpers. La mise en œuvre est assurée par une pelle équipée d'un godet de curage ; un réglage laser permet de garantir une cote conforme à l'épaisseur de la couche visée. L'énergie de compactage mise en jeu est récapitulée Tableau 6. Celle-ci est calée sur les données du GTR (remblai, PST et couche de forme) pour le compactage du limon. Pour l'argile (classée A3/A4) l'énergie est doublée par rapport à celle dispensée sur le limon. Les objectifs de densification recherchés sont "q4" (obtention de 95% pd_{OPN} en moyenne et 92% pd_{OPN} en fond de couche) pour les couches de remblai et de PST, et "q3" (obtention de 98.5% pd_{OPN} en moyenne et 96% pd_{OPN} en fond de couche) pour la couche de forme. Les couches de remblai ont été compactées au moyen d'un compacteur Hamm 3520 HT de classe VP5. Ce type compacteur vibrant à pieds permet d'éviter ou de réduire considérablement le phénomène de feuilletage souvent observé lors du compactage de sols fins. Entre deux couches successives, l'état de surface n'est pas repris par un autre moyen (autre que la circulation des dumpers sur la couche pour l'approvisionnement de la nouvelle couche). En fin de journée ou en fin de semaine, un compactage supplémentaire est réalisé avec un compacteur à cylindre lisse de classe VM5) afin d'effacer les empreintes des pieds qui pourraient retenir de l'eau en cas de pluie.

Tableau 6: modalités de compactage appliquées pour la construction de l'ouvrage

	limon A2				argile A3			
	Epaisseur (m)	Compac-teur	Nbre de passes	Vitesse (km/h)	Epaisseur (m)	Compac-teur	Nbre de passes	Vitesse (km/h)
Assise en GNT 0/31.5 mm (1couche)	0.25	VM5	10	2				
Assise en limon traité (1couche)					0.25	VM5	16	2
CDF (1 couche)	0.30	VM5	8	2	0.30	VM5	16	2
PST (3 couches)	0.30	VM5	4	3	0.30	VM5	8	3
remblai (11 couches)	0.30	VP5	4	3	0.30	VP5	8	3

Lors du compactage de la dernière couche de remblai, une rupture de transmission du compacteur VP5 est survenue. A cause de cet aléa, la suite du compactage (couches de PST et de forme) a été réalisé au moyen des deux compacteurs à cylindre lisse VM5. Quelques légers phénomènes de feuilletage très limités ont pu être observés. La Figure 7 donne quelques vues prises lors de la mise en œuvre et du compactage des couches réalisées en argile.



déchargement du dumper



réglage de casiers en argile traitée



compactage de l'argile traitée au VP5



compactage de l'argile traitée au VM5

Figure 7 : mise en œuvre et compactage de l'argile A3

4.4. Mesures réalisées pendant la mise en oeuvre

4.4.1. Teneur en eau de mise en oeuvre

La maîtrise de la teneur en eau des sols traités est un élément clé dans la réussite de cette opération et seule une valeur proche de l'OPN permet à la fois d'avoir une énergie de compactage raisonnable (épaisseur des couches et nombre de passes) et de garantir un niveau de portance à court terme compatible avec le trafic des engins de chantier. Les Figures 8 et 9 illustrent les teneurs en eau obtenues pour la mise en œuvre de chaque casier des 11 couches de remblai et des 3 couches de PST. En valeur moyenne, pour les couches de remblai et couches de PST (limon et argile), le rapport des teneurs en eau de mise en œuvre par rapport à la teneur en eau optimale du mélange (W/W_{OPN}) est de 1,04 (écart type = 0,17), ce qui conduit au classement à l'état hydrique moyennement humide qui est le plus favorable à l'obtention des objectifs de densification et de portance à court terme. Les valeurs extrêmes mesurées sur l'ensemble des 54 prélèvements réalisés sont respectivement de $W/W_{OPN} = 0,7$ et $W/W_{OPN} = 1,45$.



Figure 8 : teneurs en eau de chaque couche de remblai pour tous les casiers

TENEURS EN EAU DE MISE EN ŒUVRE DE LA PARTIE SUPERIEURE DES TERRASSEMENTS

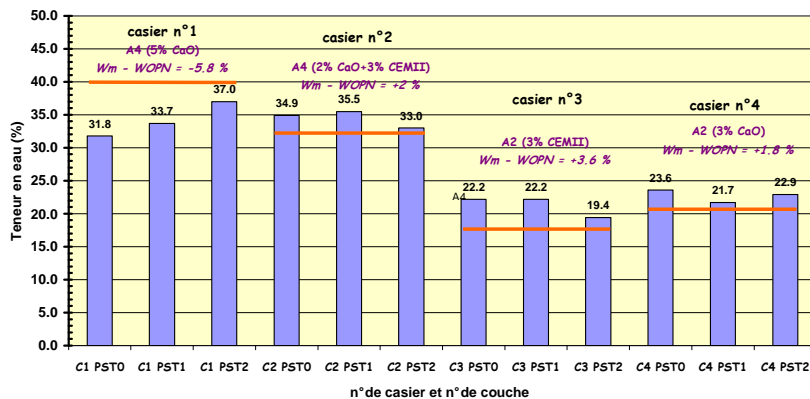


Figure 9 : teneurs en eau de chaque couche de PST pour tous les casiers

4.4.2. Masse volumique

L'appareil de mesure utilisé est le gammadensimètre mlpc® à profondeur variable GPV 25/40. De manière générale les taux de compactage atteints dans le cas de l'argile (casiers 1 à 3) sont très élevés (de 104 à 116 % de pd_{OPN}) ce qui montre la difficulté de fixer les caractéristiques optimales Proctor pour ce type de sol. La différence qui existe entre les échantillons de sol préparés pour les essais de laboratoire (séchage, écrêtage, malaxage) et le sol réellement mis en place sur l'ouvrage (humidification, malaxage) explique cet écart de densité et la difficulté de fixer une valeur optimale de densité sèche en laboratoire directement transposable sur le chantier.

Dans le cas du limon traité au ciment (casier 4), le niveau obtenu en masse volumique est assez faible (91.2 % pd_{OPN}) et l'objectif en densification n'est pas atteint. Ce phénomène peut éventuellement être expliqué en partie par une teneur en eau assez élevée à la mise en œuvre (moyenne de 22.5%). Ce phénomène ne se retrouve pas dans le cas de la PST où, dans les mêmes conditions, le taux de compactage moyen atteint est de 94.8 % pd_{OPN} pour un objectif visé de 95 % pd_{OPN} . Dans le cas du limon traité à la chaux seule (casiers 5 et 6 en remblai), l'objectif est atteint.

Concernant la PST (casier n°1), la même observation formulée pour l'argile en remblai (casiers n°1, 2 et 3) est faite : le niveau de taux de compactage atteint est très élevé (115 % pd_{OPN}) mais reste en deçà de la saturation ($pd = 1.42 \text{ t/m}^3$ à $w = 34\%$). Dans le cas du traitement mixte sur l'argile (casier 2), le taux de compactage atteint est de 98.4 % pd_{OPN} ce qui correspond à 99% de saturation à la teneur en eau considérée ($w = 37 \%$). Les deux modalités en limon traité (casiers n° 3 et n° 4) conduisent à des niveaux de masse volumique qui satisfont à l'objectif. Pour le limon traité au ciment seul (casier n°3), la teneur en eau de 22% conduit à un taux de compactage moyen de 94.8 % pd_{OPN} ce qui représente environ 99% de saturation. Dans le cas du traitement mixte (casier n°4) réalisé à la teneur optimale ($w = 21\%$), le taux de compactage moyen est élevé (100.1 % pd_{OPN}).

Le compactage des trois casiers de la couche de forme a été réalisé dans de bonnes conditions de teneur en eau. Seul le taux de compactage pour le limon (casier n°3) est légèrement inférieur à l'objectif (96.6 % pd_{OPN}).

4.4.3. Portance

Le contrôle de la portance (Tableau 7) est réalisé au moyen de la Dynaplaque mlpc®. Afin de ne pas ralentir la construction de l'ouvrage, les mesures sont exécutées à très court terme, quelques heures après la fin du compactage. Les niveaux de portance sur la PST atteignent 50 MPa sauf sur la modalité en limon traité à 3% de CEM II. La teneur en eau élevée sur ce casier entraîne un niveau de portance plus faible (30 MPa) mais la prise du mélange a dû entraîner une augmentation rapide du module. Le minimum requis de 35 MPa pour la construction de la couche de forme sus-jacente peut donc être considéré comme atteint et le niveau d'arase au sens du GTR est de classe AR2. Pour la couche de forme et pour les trois modalités de sols traités les modules obtenus sont compris entre 63 et 90 MPa.

Tableau 7 : résultats des mesures de portance sur la PST et la couche de forme

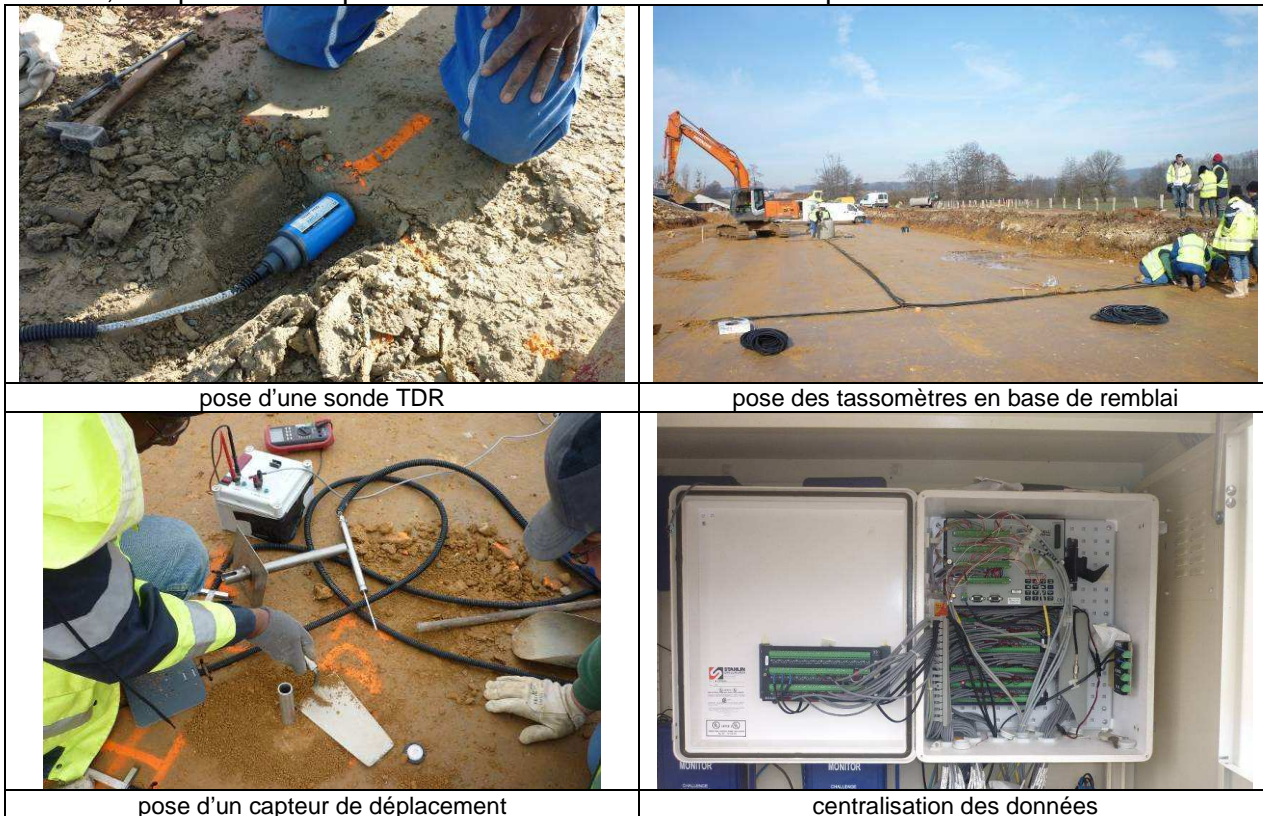
PST mesures du 08/04/2010						
casier	sol	couche	WOPN	nbre de mesures	E	W - WOPN à la mise en œuvre
			(%)		(MPa)	(%)
1	A4 5% CaO	PST2	40	5	68	- 3.0
2	A4 2% CaO 3% CEMII	PST2	32.5	4	52	+ 0.5
3	A2 3% CEMII	PST2	17.7	4	49	+ 1.7
4	A2 3% CaO	PST2	20.9	3	30	+ 3.5

CDF mesures du 09/04/2010						
casier	sol	couche	WOPN	nbre de mesures	E	W - WOPN à la mise en œuvre
			(%)		(MPa)	(%)
1	A4 5% CaO	CDF0	40	6	63	- 1.1
2	A4 2% CaO 3% CEMII	CDF0	32.5	12	69	+ 2.0
3	A2 1% CaO 5% CEMII	CDF0	17.5	6	90	+ 3.1

5. Instrumentation de l'ouvrage

5.1. Capteurs mis en place dans l'ouvrage

Pour réaliser un suivi dans le temps du comportement du remblai, des capteurs ont été mis en place par le Centre d'Expérimentation et de Recherche du CETE Normandie Centre lors de sa construction (Figure 10) afin de mesurer les différents paramètres suivants : la teneur en eau volumique du sol (44 sondes TDR), la température du sol (44 sondes), le tassement total de l'ouvrage (6 tassomètres), la hauteur de la nappe (4 capteurs de hauteur d'eau), la succion et la température en peau (24 capteurs de pression et 10 sondes PT100). Un système d'acquisition de données, une centrale météo et un panneau solaire, complètent le dispositif. Les données sont transmises par GSM.



pose d'une sonde TDR

pose des tassomètres en base de remblai

pose d'un capteur de déplacement

centralisation des données

Figure 10 : instrumentation du remblai expérimental

5.2. Suivi des informations

Les informations sont collectées depuis l'été 2010 et sont mises à disposition des partenaires du projet TerDOUEST. Elles permettent d'une part de suivre le comportement hydrique, thermique et mécanique de l'ouvrage et sont utilisées pour caler des modèles numériques en cours de développement. A titre d'exemple les Figures 11 et 12 illustrent le suivi de ces paramètres.

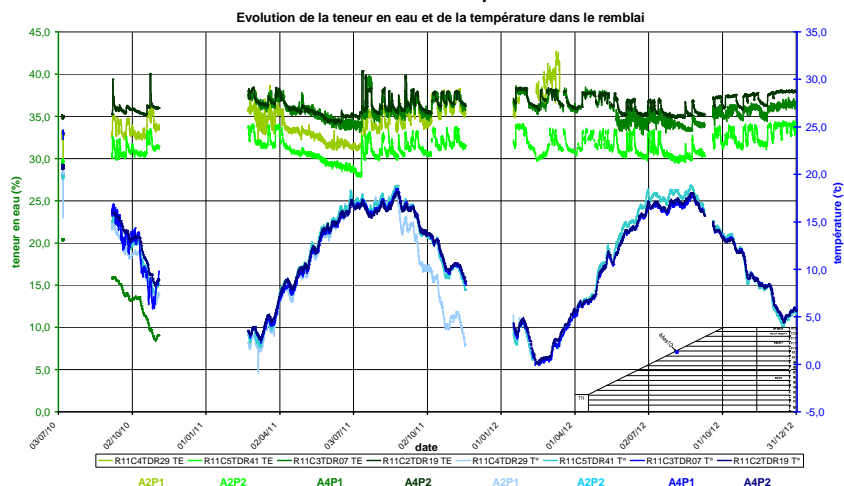


Figure 11 : exemple de relevé de la teneur en eau et de la température en peau de remblai

Evolution de la succion dans l'Argile sur le profil 1 en peau (25 cm de profondeur)

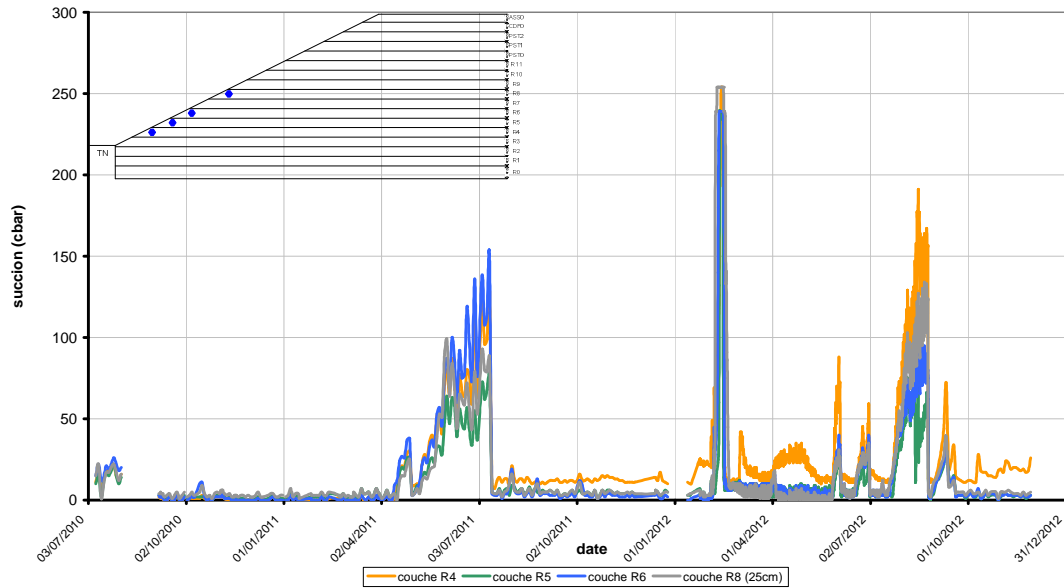


Figure 12 : exemple de relevé de la succion en peau de remblai

6. Conclusion

Cette étude a permis de vérifier que la construction d'un ouvrage en terre en sol non conventionnel est possible avec les moyens classiques de mise en oeuvre à la double condition d'utiliser des modalités de traitement de sol adaptées et de réaliser les opérations de traitement et de compactage avec une méthodologie aménagée. La mouture des mélanges et les caractéristiques hydriques à la mise en oeuvre ont permis une mise en oeuvre des couches garantissant l'obtention des objectifs recherchés (épaisseurs, masse volumique et portance à court terme). Depuis sa fin de construction, aucune pathologie n'a été relevée sur l'ouvrage. Les capteurs qui ont été intégrés lors de la construction permettent de réaliser son suivi dans le temps qui est un des objectifs recherchés au travers du projet national ANR TerDOUEST. Cet ouvrage, dont les conditions de réalisation sont précisément connues, est considéré comme une référence dans le monde académique et celui des professionnels. Pour les programmes de recherches futurs, il pourra également être utilisé pour fournir des échantillons de sols traités dont les analyses en laboratoire pourraient permettre d'avancer dans la connaissance de la durabilité des sols traités à la chaux et/ou au liant hydraulique.

7. Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier l'Agence Nationale pour la Recherche qui a cofinancé le projet TerDOUEST.

Nous tenons également à remercier tous les partenaires du projet : l'IFSTTAR (centres de Paris et Nantes), les sociétés LHOIST et CIMBETON, le Syndicat Professionnel des Terrassiers de France (SPTF), la société EGIS, la SNCF, l'Institut des Matériaux Jean Rouxel de Nantes (IMN), l'Ecole de Géologie de Nancy (LAEGO), le Centre de Recherche de la Matière Divisée (CRMD), ARMINES, l'Ecole des Ponts (Institut Navier), le CETE Normandie-Centre qui ont tous contribué efficacement au bon déroulement de cette recherche.

Nos remerciements vont aussi à l'entreprise Roger Martin, au laboratoire Régional des Ponts et Chaussées d'Autun et au Conseil Général de Haute-Saône pour leur implication et leur efficacité dans la construction de cet ouvrage expérimental.