

RENFORCEMENT DES DIGUES DE LOIRE PAR LA TECHNIQUE DU DEEP SOIL MIXING ; DEUX METHODES PROPOSEES - SUIVI SUR DEUX ANS

LEVEES REINFORCED BY THE DEEP SOIL MIXING METHOD IN THE LOIRE AREA; TWO PROPOSED METHODS – TWO YEARS INVESTIGATIONS

Alain Le Kouby¹, Lucile Saussaye², Yannick Fargier², Yasmina Boussafir¹, Edouard Durand², Christophe Chevalier¹, Yannick Ananfouet², Sébastien Patouillard³, Nathalie Manceau³, Loïc Gervais³, Nicolas Auger²

¹ Université Paris Est / IFSTTAR, Champs-sur-Marne, France

² CEREMA / Direction Territoriale Normandie-Centre

³ DREAL Centre-Val de Loire, SLBLB, Orléans, France

RÉSUMÉ – Cet article s'intéresse aux écrans étanches mis en œuvre par la méthode de « tranchée de sol mixé » sur les digues de Loire afin de parer au risque d'érosion interne. Deux techniques ont été testées et un suivi des ouvrages a été organisé. Une comparaison avec les résultats de mélanges effectués en laboratoire a été étudiée et l'évolution dans le temps des propriétés hydrauliques et mécaniques fait l'objet d'un protocole de suivi..

ABSTRACT – The proposed paper focuses on levees reinforced by the Deep Soil Mixing method in the Loire area against internal erosion. Two techniques have been tested. Mechanical and hydraulic properties are followed on a long term period. In addition, comparisons between results obtained from laboratory and in situ mixed materials are presented.

1. Introduction

Dans le cadre du renforcement des digues de Loire, l'IFSTTAR et le CEREMA ont été sollicités par la DREAL Centre-Val de Loire afin d'évaluer une technique de restauration de l'étanchéité récemment utilisée en France en adaptant la technique du *Deep Soil Mixing* utilisée dans les domaines des fondations spéciales et profondes. Dans le cas du val d'Orléans, il s'agit de réaliser un écran étanche par mélange en place grâce à cette technique de « tranchée de sol mixé ». Deux méthodes ont été testées sur deux sites du val d'Orléans. La méthode sèche consiste à réaliser une tranchée de 1 m de profondeur, à épandre du ciment en poudre à un dosage fixé. L'outil de malaxage mélange ensuite le sol avec le ciment en rajoutant de l'eau jusqu'à une profondeur maximale de 9 m. La méthode humide consiste, quant à elle, à injecter directement un mélange contrôlé d'eau et de liant hydraulique (coulis) à un C/E fixé.

2. Contexte de l'étude

2.1. Ouvrages à réaliser

Deux ouvrages ont été réalisés en avril 2013 sur la val d'Orléans (VO), plus précisément à Guilly, au lieu-dit Maison Vieille, et Sigloy (45) selon les prescriptions du CCTP (2012) et de la norme NF EN 14679.

Tableau 1. Sites identifiés pour un renforcement de corps de digue sur le val d'Orléans

Site	Technique ciblée	Longueur d'écran (m)	Hauteur de levée (m)	Profondeur à atteindre (m)
Maison Vieille	Tranchée de sol mixé par voie sèche (VS)	126	5,0	8,5
Sigloy	Tranchée de sol mixé par voie humide (VH)	112	3,5	7,5

2.2. Caractéristiques physiques des sols rencontrés sur les 2 sites

2.2.1. Profils lithologiques

Les profils lithologiques des deux sites sont présentés dans les tableaux 2 et 3. Ces données sont issues d'études géotechniques préalables aux travaux.

Tableau 2. Lithologie indicative sur le site de Maison Vieille

Structure	Nature des sols	Profondeur de la base de la couche (m)	Cote de la base de la couche (m NGF)	Classes GTR	Perméabilité (m/s)			
					in situ			en laboratoire (oedomètre)
					Essais Nasberg / Lefranc	Sondage Perméafor*		
		k	Compacité					
Remblai	Argile à sable	0,5 à 1,4	110,7 à 111,6	-	-	-	Très faible	-
Corps de digue	Silt argileux à argile sableuse	3,2 à 3,4	108,8	A1, A2, B5	$2,0 \cdot 10^{-7}$ à $7,1 \cdot 10^{-7}$	$\leq 1,25 \cdot 10^{-6}$	Très faible à faible	$7,0 \cdot 10^{-11}$
Formation alluvionnaire F1	Argile	5,0 à 6,0	106,0 à 107,1	A2, A3, A4, B6	$9,9 \cdot 10^{-8}$ à $5,9 \cdot 10^{-8}$		Faible à élevée	$4,0 \cdot 10^{-10}$
Formation alluvionnaire F2	Argile silteuse à silt sableux	6,0 à 6,7	105,3 à 106,0	A2	$3,5 \cdot 10^{-6}$		$1,25 \cdot 10^{-5}$	Elevée
Formation alluvionnaire F3	Sable à sable graveleux	11,2 à 12,3	99,8 à 100,9	B2, B5	$3,5 \cdot 10^{-6}$ à $8,2 \cdot 10^{-5}$	$1,25 \cdot 10^{-5}$ à $1,25 \cdot 10^{-3}$	Elevée à très faible	-

Tableau 3. Lithologie indicative sur le site de Sigloy

Structure	Nature des sols	Profondeur de la base de la couche (m)	Cote de la base de la couche (m NGF)	Classes GTR	Perméabilité (m/s)			
					in situ			en laboratoire (oedomètre)
					Essais Nasberg / Lefranc	Sondage Perméafor*		
		k	Compacité					
Remblai	Sable silteux	0,5	110,6	-	-	$2,50 \cdot 10^{-4}$ à $1,25 \cdot 10^{-6}$	Très faible	-
Corps de digue	Silt argileux	2,5 à 3,5	107,6 à 108,7	A1, A2	$4,2 \cdot 10^{-8}$ à $2,6 \cdot 10^{-7}$	$\leq 1,25 \cdot 10^{-6}$	Très faible à faible	$2,4 \cdot 10^{-10}$
Formation alluvionnaire F1	Argile silteuse	5,0 à 5,5	105,7 à 106,1	A2	$3,1 \cdot 10^{-8}$			$8,6 \cdot 10^{-10}$
Formation alluvionnaire F2	Silt sableux	6,0	105,1	B5, B6	-			-
Formation alluvionnaire F3	Sable graveleux	9,2	101,9	B5, D2	-		Elevée	-

2.2.2. Caractéristiques physiques des matériaux de la pré-tranchée

Au cours des chantiers, l'axe des écrans est matérialisé par une pré-tranchée de 1 m de profondeur et de 1 m de large environ. Les sols de la pré-tranchée ont été prélevés afin de réaliser des mélanges sol-ciment en laboratoire, bien qu'ils ne soient pas représentatifs de l'ensemble des sols malaxés en place. Une caractérisation géotechnique des sols a été effectuée (Tableau 4). Elle est conforme aux études géotechniques préliminaires.

Tableau 4. Propriétés géotechniques des sols prélevés dans la prétranchée

Echantillon	ρ (kg/m ³)	0/2 μ m (%)	0/80 μ m (%)	0/2mm (%)	D _{max} (mm)	VBS (g/100g de sol sec)	w _L (%)	IP (%)	Classification GTR
Sigloy	1600	28	62	98	5	2,41	32	17	A2
Maison Vieille	1600	20	48	98	5	1,26	33	19	A1

3. Réalisation des écrans et organisation du suivi

3.1. Réalisation d'un écran par tranchée de sol mixé

L'organigramme de la Figure 2 permet d'appréhender les différentes étapes de réalisation d'un écran étanche sol-ciment, illustrées à la Figure 3.

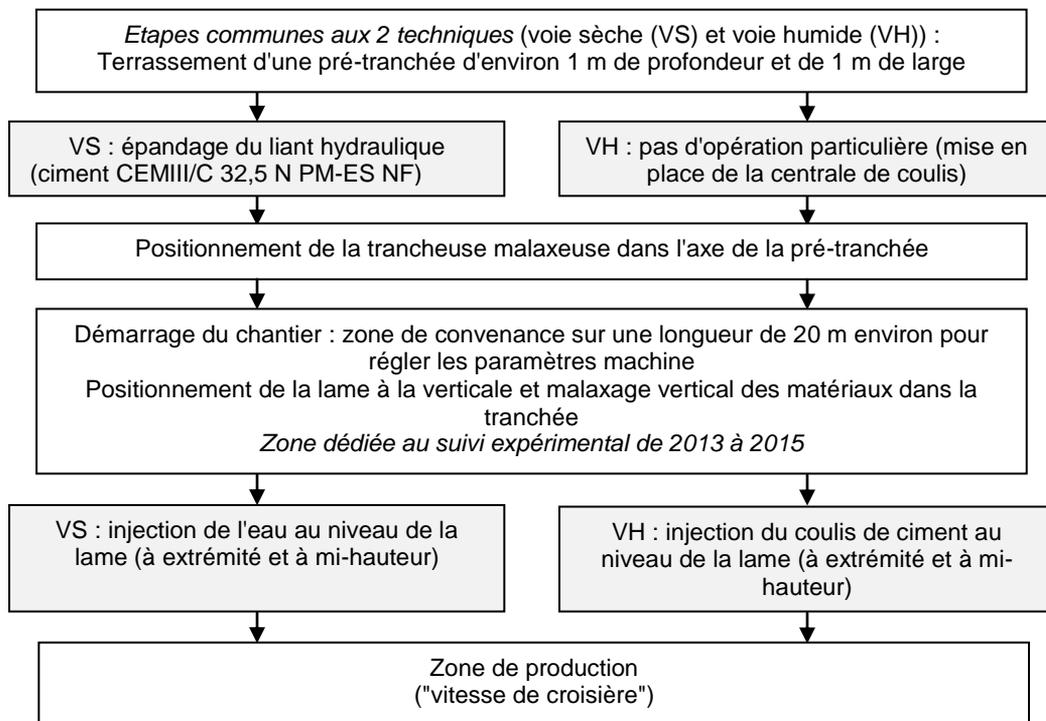


Figure 2. Réalisation d'un écran étanche sol-ciment.

3.4. Suivi des écrans à court et à long termes

Un programme de suivi a été organisé :

- une analyse des enregistrements de paramètres de la machine,
- des prélèvements de matériaux frais à la surface de la tranchée (rejet ou spoil) pour effectuer des essais de résistance à la compression simple R_c et des essais de perméabilité en laboratoire,

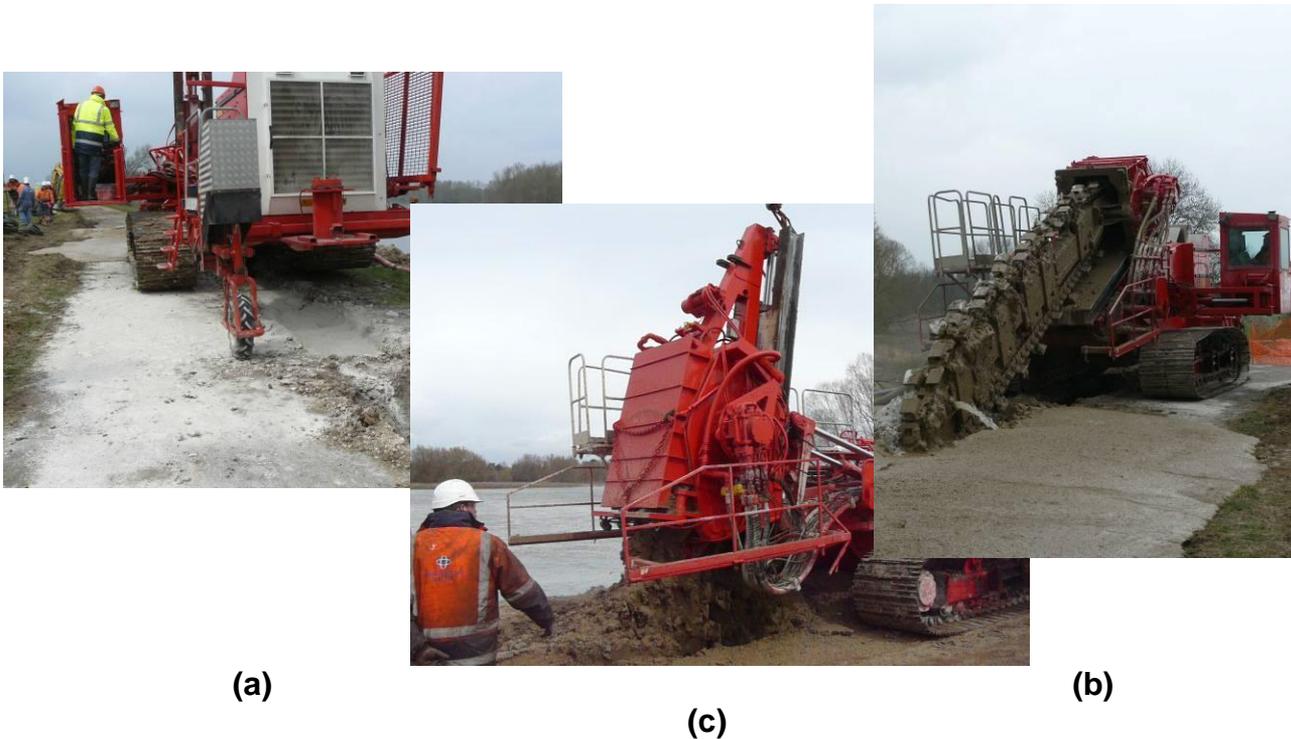


Figure 3. Réalisation de l'écran étanche par voie sèche : (a) pré-tranchée et épandage du ciment, (b) trancheuse malaxeuse positionnée dans l'axe de la pré-tranchée et injection de l'eau à partir de la lame avant mise en place de la lame à la verticale, (c) malaxage vertical en zone de production.

- des mélanges en laboratoire confectionnés à partir de sols prélevés dans les pré-tranchées, à des dosages en ciment proches de ceux utilisés sur chantier, pour comparer les deux approches, VS et VH,
 - des carottages dans la zone de convenance (ZC), pour chacun des sites, à 28, 90, 365 jours et deux ans pour des essais de perméabilité in situ et en laboratoire.
- La zone de convenance servant au réglage des paramètres de production, de fortes dispersions des dosages en ciment et eau ont été constatées.

4. Conductivités hydrauliques

Deux types d'essais de perméabilité ont été réalisés à 1 et 2 ans, sur les 2 sites :

- des essais d'eau en forage, de type Nasberg (NF X 30-423, 2011),
- des essais de perméabilité en cellule triaxiale sur des éprouvettes provenant de sondages carottés (XP CEN ISO/TS 17892-11, 2005).

La Figure 4 permet de synthétiser l'ensemble des valeurs obtenues. Les mesures in situ sont encadrées en noir. Chaque valeur est positionnée sur le graphique en fonction de la profondeur moyenne d'essai.

Globalement, la perméabilité des mélanges sol-ciment constitutifs des écrans diminuent entre 1 et 2 ans, quels que soient le site et la méthode utilisée, ce qui est favorable en termes de pérennité de l'ouvrage.

Entre 2,50 et 6,00 m de profondeur, les perméabilités à 2 ans de l'écran de Sigloy sont comprises entre $3 \cdot 10^{-10}$ et $2 \cdot 10^{-9}$ m/s tandis que celles de l'écran de Maison Vieille sont comprises entre 1 et $3 \cdot 10^{-9}$ m/s. La perméabilité de l'écran de Sigloy est donc inférieure ou égale à celle de l'écran de Maison Vieille. Cette observation est également vraie à 1 an.

La très faible perméabilité mesurée sur le sondage carotté de Sigloy, à 2 ans, à environ 1 m de profondeur, pourrait être associée au surdosage en ciment constaté au niveau de la pré-tranchée.

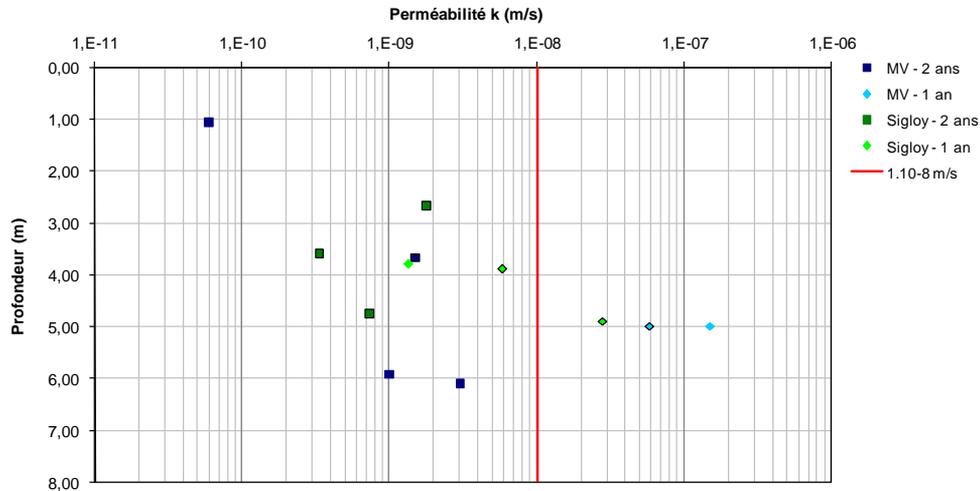


Figure 4. Suivi des ouvrages - mesures des perméabilités sur deux ans.

5. Performances mécaniques

5.1. Résistances à la compression simple R_c mesurés sur sondages carottés

Un critère de résistance à la compression simple a été proposé : 1,5 MPa à 28 jours. A 1 et 2 ans, il est attendu que les valeurs de résistance mécanique soient au moins supérieures à ce seuil.

5.1.1. Ecran de Maison Vieille

Sur le site de Maison Vieille (Figure 5), les R_c augmentent entre 1 et 2 ans. Toutefois, la valeur de R_c devrait être plus ou moins homogène en fonction de la profondeur puisque la trancheuse doit mélanger le sol sur toute la profondeur.

A 1 an, seules 3 éprouvettes ont pu être taillées à partir du sondage carotté, témoignant de la fragilité du mélange sol-ciment vis-à-vis du carottage.

Sur le sondage carotté à 2 ans, à partir duquel 13 éprouvettes ont été extraites, il est observé une diminution de R_c avec la profondeur au-delà de 1 m de profondeur, traduisant l'influence de la pré-tranchée. En effet, cette dernière, dans laquelle est épandu le ciment anhydre avant le début du malaxage, est probablement la zone où se trouve la plus grande quantité de ciment, même après le mélange en place. Si l'énergie de malaxage permet effectivement de répartir le ciment sur la hauteur de la tranchée, la quantité de ciment n'en reste pas moins plus importante dans la partie supérieure.

Après 2 ans, à partir de 2 m de profondeur, les valeurs de R_c restent, pour la plupart, inférieures aux 1,5 MPa définis à 28 jours.

5.1.2. Ecran de Sigloy

Sur le site de Sigloy (Figure 6), le mélange sol-ciment prélevé par carottage est plus résistant que celui de Maison Vieille. La méthode utilisée est la voie humide. Le dosage en ciment dans la zone de convenue est de 280 kg/m^3 de sol à traiter à Sigloy tandis qu'il est d'environ 210 kg/m^3 à Maison Vieille. Un facteur réducteur devrait donc être appliqué pour pouvoir comparer les résultats obtenus sur les 2 sites.

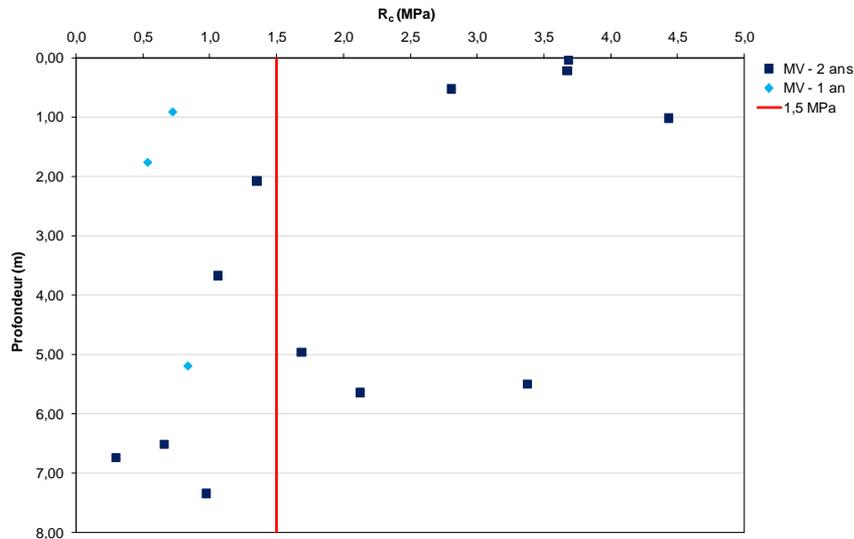


Figure 5. Evolution de R_c avec la profondeur.

Avec des valeurs de R_c à 2 ans s'échelonnant entre 1,5 et 9 MPa, il n'est pas possible de conclure quant à l'homogénéité du mélange sol-ciment constitutif de l'écran.

Il est constaté une augmentation de la résistance mécanique du mélange entre 1 et 2 ans. Les valeurs sont, pour la plupart, supérieures au critère de 1,5 MPa, hors prise en compte du vieillissement. Ces valeurs sont comparées à celles obtenues sur les mélanges en laboratoire.

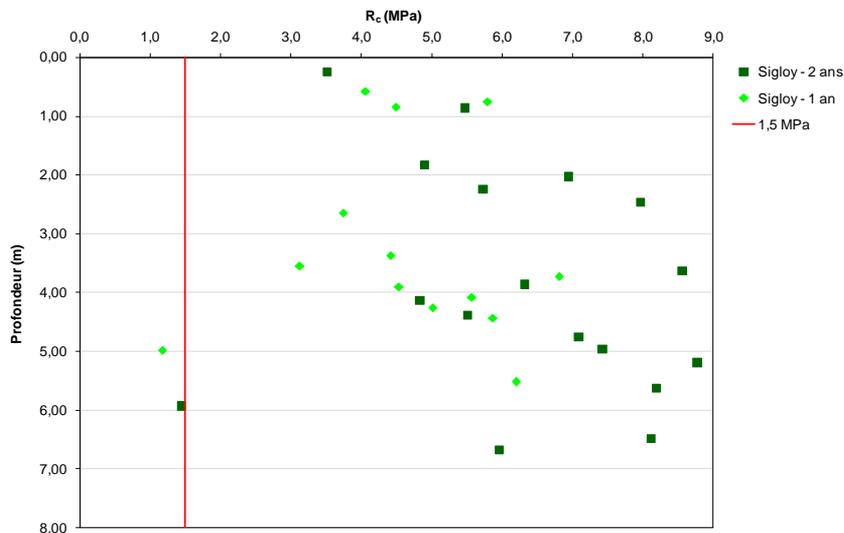


Figure 6. Evolution de R_c avec la profondeur.

5.2. Résistances à la compression simple R_c mesurés sur les mélanges confectionnés en laboratoire

5.2.1. Réalisation des mélanges

Les protocoles de malaxage et de coulage des mélanges sont très semblables à ceux des différentes équipes internationales travaillant sur le sujet (Kitazume et Nishimura, 2009 ; Guimond-Barrett, 2013). Les formulations réalisées sont récapitulées dans le Tableau 5.

Tableau 5. Mélanges réalisés en laboratoire

VO : val Orléans, S : Sigloy, MV : Maison Vieille, W34 : teneur en eau de 34 %, C/E : rapport massique entre la quantité de ciment et la quantité d'eau, C : masse de ciment par m³ de sol naturel à traiter.

Sol	Références	C (kg/m ³)	Teneur en eau (%)	C/E
Val d'Orléans : Sigloy	VO-S_C280_W34	280	34	0,44
Val d'Orléans : Sigloy	VO-S_C210_W34	210	34	0,34
Val d'Orléans : Maison Vieille	VO-MV_C210_W34	210	34	0,34
Val d'Orléans : Sigloy	VO-S_C210_W50	210	50	0,23
Val d'Orléans : Maison Vieille	VO-MV_C210_W50	210	50	0,23
Val d'Orléans : Sigloy	VO-S_C140_W34	140	34	0,23
Val d'Orléans : Maison Vieille	VO-MV_C140_W34	140	34	0,23
Val d'Orléans : Sigloy	VO-S_C175_W34	175	34	0,23

5.2.2. Performances mécaniques

La Figure 7 présente les R_c mesurées en fonction du temps de cure. Chaque point correspond à la moyenne de trois mesures. Pour un dosage de 210 kg/m³, on note la différence de R_c obtenue avec une teneur en eau de 34 % (proche de la limite de liquidité et impossible à obtenir sur chantier) et de 50 % atteinte plus facilement sur chantier.

Ce dosage en ciment de 210 kg/m³ constitue un dosage minimal pour obtenir la prise rapide du mélange. En effet, avec 140 kg de ciment/m³, le temps de prise est compris entre 14 et 28 jours ; avec 175 kg/m³, la prise s'effectue entre 7 et 14 jours.

Le seuil de 1,5 MPa n'est atteint à 28 jours, en laboratoire, que pour un dosage en ciment de 210 kg/m³. Avec 175 kg de ciment/m³, cette valeur n'est atteinte qu'après 50 jours de cure ; avec 140 kg/m³, cette valeur n'est pas atteinte sur le temps d'étude.

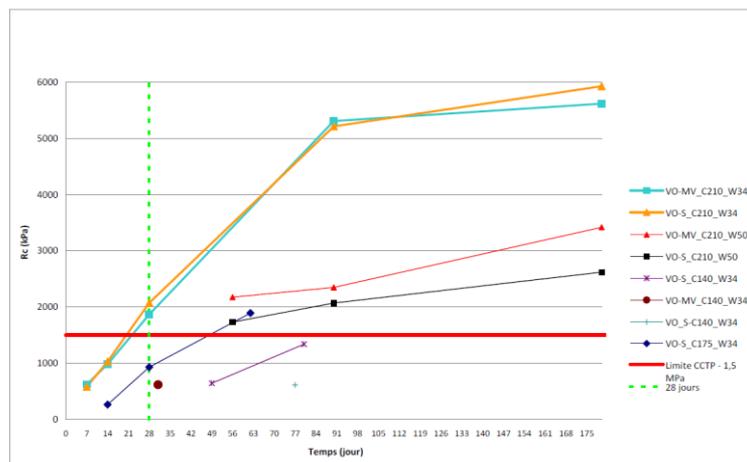


Figure 7. Evolution de R_c en fonction du temps des mélanges en laboratoire

5.3. Comparaison des performances mécaniques obtenues sur sondages carottés à 2 ans et sur les mélanges en laboratoire

Pour l'écran de Maison Vieille, entre 0 et 1 m de profondeur, les R_c obtenues à 2 ans sur sondage carotté correspondent au maximum atteint à 1 an en laboratoire de C140 et C210-W50. Entre 1 et 5 m de profondeur, les R_c sont inférieures aux R_c à 180 jours de C140_W34. Entre 5 et 6 m, les R_c sont comprises entre les R_c à 180 jours de C140_W34 et C210_W50. Au-delà de 6 m, les R_c sont proches des valeurs de début de prise de C140_W34 ou C210_W34. Pour l'écran de Sigloy, les valeurs de R_c sont comprises entre les maximums de C175_W34, C210_W50 et C280_W34.

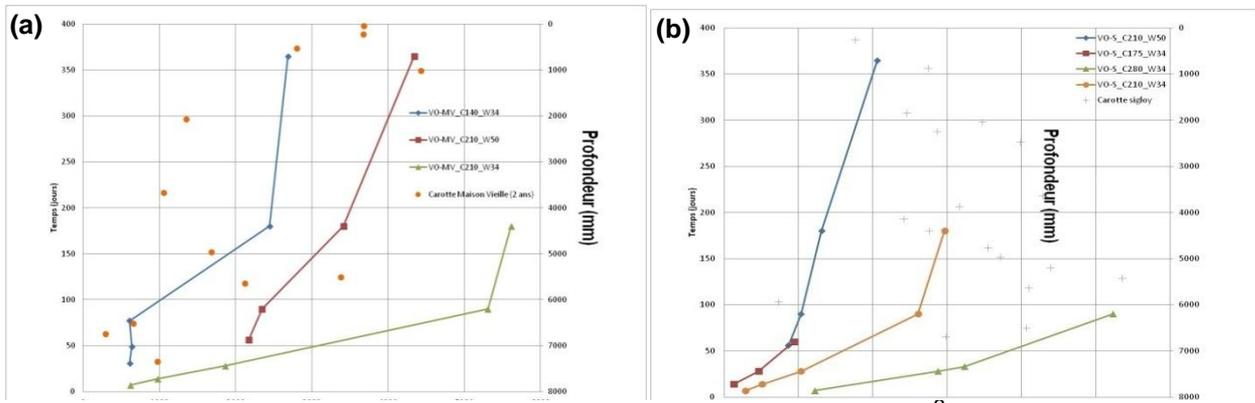


Figure 8. (a) Maison Vieille – dosage en ciment de 200-210 kg/m³, (b) Sigloy – dosage en ciment de 280-300 kg/m³.

6. Conclusions et perspectives

Le renforcement des digues par écran interne à l'aide de la méthode de « tranchée de sol mixé » présente de nombreux avantages tel que la rapidité d'exécution mais nécessite la possibilité de régler le dosage en ciment en fonction du type de matériau. Les propriétés hydrauliques semblent être satisfaisantes au regard des échantillons prélevés. L'hétérogénéité du matériau obtenue après mélange dans le cas des deux techniques constitue un domaine qui nécessite encore des travaux expérimentaux avant de valider la méthode de contrôle des caractéristiques mécaniques de l'ouvrage pour assurer sa pérennité dans le temps et notamment son étanchéité. Depuis l'expérimentation sur les sites du val d'Orléans, de nouveaux écrans étanches ont été réalisés par « tranchée de sol mixé » en améliorant leur mise en œuvre et permettant d'envisager d'améliorer encore l'approche.

Références bibliographiques

AFNOR. NF EN 13286-41. (2003). Mélanges traités et mélanges non traités aux liants hydrauliques - Partie 41 : méthode d'essai pour la détermination de la résistance à la compression des mélanges traités aux liants hydrauliques.

AFNOR. XP CEN ISO/TS 17892-11. (2005). Reconnaissance et essais géotechniques - Essais de laboratoire sur les sols - Partie 11 : détermination de perméabilité à charge constante et à charge variable décroissante

AFNOR. NF X 30-423. (2011). Détermination du coefficient de perméabilité d'un terrain par essai à charge variable en forage ouvert. 32 p.

CCTP. (2012). Mise en œuvre de mélanges en place pour le renforcement des zones de recouvrement du val d'Orléans

European-Standard (2005). Execution of special geotechnical works - Deep Mixing. European Committee for Standardization (CEN) Brussels. Standard. NF EN 14679

Eurosoilstab (2000). Development of design and construction methods to stabilise soft organic soils. Design guide soft soil stabilisation. European project BE 96-3177. Report CT97-0351.

GUIMOND-BARRETT, A. (2013). Influence of mixing and curing conditions on the characteristics and durability of soils stabilised by deep mixing. Thèse de doctorat Université Paris Est.

KITAZUME, M. and NISHIMURA, S. (2009). Influence of specimen preparation and curing conditions on unconfined compression behaviour of cement-treated clay. Deep Mixing '09, Okinawa, Japan.