HAL
open science

Réutilisation d'argiles à graviers en remblai de grande hauteur : Le chantier expérimental de Carmaux

Fabrice Rojat, Virginie Gendre

To cite this version:

Fabrice Rojat, Virginie Gendre. Réutilisation d'argiles à graviers en remblai de grande hauteur : Le chantier expérimental de Carmaux. Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées, 2009, 274, pp 89-107. hal-00425427

HAL Id: hal-00425427

https://hal.science/hal-00425427v1

Submitted on 21 Oct 2009

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.

Réutilisation d'argiles à graviers en remblai de grande hauteur : le chantier expérimental de Carmaux

Fabrice ROJAT*
Virginie GENDRE
Laboratoire régional des ponts et chaussées de Toulouse

RÉSUMÉ

Un chantier expérimental, composé d'un remblai instrumenté et de planches d'essai, a été réalisé en amont des travaux de la déviation de Carmaux. Il a mis en évidence des difficultés de représentativité des études dans la formation hétérogène des « argiles à graviers », en particulier concernant la qualification de l'état hydrique. Il a également permis d'établir des préconisations, plus contraignantes que celles du GTR, pour le réemploi en remblai de grande hauteur des matériaux argileux les plus indurés et secs. Les critères pris en compte pour ces sols évolutifs ont concerné aussi bien la mouture du matériau que son aptitude au compactage et sa sensibilité aux gonflements et retraits. Ce chantier expérimental constitue en outre un retour d'expérience original pour la pose d'une instrumentation spécifique au suivi des teneurs en eau (sondes TDR :*Time Domain Reflectometry*) et des déformations. Le suivi à long terme permettra de mieux comprendre l'évolution des corps de remblai argileux en conditions réelles.

Reuse of gravelly clays on high embankments: the Carmaux experimental site

ABSTRACT

An experimental site, composed of an instrumented embankment and test layers, has been carried out before the main carthworks of the Carmaux bypass. It reveals the difficulties involved in conducting representative studies in the presence of heterogeneous geological formations containing «gravelly clays», in particular as regards qualifying the hydric state. This site has also enabled generating a set of guidelines, more restrictive than those found in the GTR Technical Guidelines, for reuse of the hardest and driest clayey materials on high embankments. The criteria incorporated for these modular soils relate to grinding, compaction capability and sensitivity to swelling and shrinkage. The Carmaux experimental embankment also provides an original source of feedback on installation of instrumentation specifically designed to measure water content (use of TDR - time domain reflectometry - *probes) and deformation. Long-term monitoring will improve understanding of the evolution in clayey embankment structures under actual operating conditions.*

* AUTEUR À CONTACTER :
Fabrice ROJAT
fabrice.rojat@developpement-durable.gouv.fr

INTRODUCTION

La déviation de Carmaux entre dans le cadre de l'aménagement de la RN 88 entre Toulouse et Séverac-le-Château (A75). Il s'agit d'une route neuve à 2 × 2 voies, sur une longueur d'environ 12 km, ce qui lui confère un statut de route express. Le tracé, passant à l'est de l'agglomération de Carmaux, suit sensiblement une orientation sud-nord et franchit une succession de collines et thalwegs, ce qui se traduit au niveau des terrassements par des volumes de déblais et de remblais importants (3 300 000 m^3 extraits dont 2 760 000 m^3 réutilisés), de grandes hauteurs de talus, et des ouvrages hydrauliques de dimensions conséquentes. On dénombre sur le tracé sept remblais de très grande hauteur (15 à 30 m), dont un sur sol compressible. Des terrassements morphologiques (modelage des pentes de talus) ont dû être réalisés pour améliorer l'intégration paysagère de la

déviation. Les travaux ont eu lieu de 2002 à 2006 ; le chantier expérimental présenté ici, qui en fait partie, a été exécuté en 2003.

La géologie rencontrée sur ce tracé est composée essentiellement de deux natures de sols : des argiles à graviers (sidérolithique) et des micaschistes, dans un rapport d'environ 2/3 pour 1/3. Il s'agit d'un contexte difficile, du fait de la dureté très variable des matériaux schisteux d'une part, et des caractéristiques propres des argiles à graviers d'autre part. Le projet étant excédentaire, il était nécessaire, pour ne pas aggraver ce déséquilibre, de viser une réutilisation maximale des matériaux du site. Cela a conduit la maîtrise d'ouvrage du projet (direction départementale de l'Équipement du Tarn, service grandes infrastructures) à s'interroger sur les possibilités de réemploi des différents types de matériaux en couche de forme (objectif AR2 / PF3) ainsi que sur les conditions d'extraction et de mise en remblai des argiles à graviers.

En effet, dès la phase d'étude, ces dernières étaient apparues comme une formation hétérogène, peu aisée à caractériser dans une optique de chantier, aquifère dans ses niveaux les plus grossiers, et présentant un certain pourcentage de matériaux indurés, secs et gonflants. À titre d'exemple, sur l'ensemble des déblais D6, D8 et D9, totalisant 1 100 000 m^3, la proportion de matériaux à l'état sec à très sec était évaluée à plus de 35 %, dont la moitié de classe A_2 / C_1A_2 présentant des problèmes de gonflement sous imbibition. Des zones indurées avaient en outre été régulièrement traversées par les forages (non quantifiées en terme de volume au stade des études). De tels matériaux sont évolutifs et, s'ils sont mis en œuvre de manière inadaptée, sont susceptibles de causer des dommages multiples à l'ouvrage (fissuration, reptation, effondrement sous imbibition, rupture, etc. *cf.* **[1]**). Le problème du réemploi des argiles à graviers sèches et indurées et de leur tenue à long terme constituait donc pour la maîtrise d'ouvrage un enjeu important, en particulier dans le contexte de remblais de grande hauteur.

Avec l'assistance technique du Laboratoire régional des Ponts et Chaussées de Toulouse et du Laboratoire central des Ponts et Chaussées, un chantier expérimental, préalable aux travaux de la déviation et destiné à en lever les incertitudes majeures, a donc été proposé.

La réalisation d'un chantier expérimental permet à la fois de tester en vraie grandeur les conditions de réalisation des ouvrages en terre et d'obtenir des quantités de matériau importantes en vue d'une caractérisation fine en laboratoire. Deux composantes ont donc été retenues pour l'expérimentation : d'une part la mise en œuvre d'un remblai instrumenté pour permettre un suivi à long terme des déformations et d'autre part, pour les formations sèches et indurées, la réalisation de planches d'essai et d'une caractérisation fine en laboratoire.

L'objectif final est d'apporter des éléments de réponse aux questions suivantes :

– Quelles sont les conditions optimales d'extraction et de préparation des matériaux afin de limiter les hétérogénéités dans le corps de remblai ?

– Comment caractériser l'aptitude au compactage des matériaux secs et indurés (influence de l'épaisseur des couches élémentaires, de la teneur en eau, de l'intensité de compactage...), la référence Proctor étant dans ce cas liée à la déstructuration obtenue *in situ* ?

– Quelle est la sensibilité des matériaux aux variations d'état hydrique dans le corps de remblai, et quelles déformations peut-on en attendre à long terme ?

L'ouvrage instrumenté vise également à évaluer la pertinence et la précision de différents outils de suivi des teneurs en eau dans les corps de remblai (sondes TDR, panneau électrique).

Cet article présente la réalisation du chantier expérimental, en tant que retour d'expérience (méthodes de pose des instrumentations e.g.), ainsi que les réponses qui ont pu être fournies aux interrogations initiales. L'évolution du remblai dans le temps est également évoquée, dans la limite des informations disponibles après un suivi de trois ans.

LES MATÉRIAUX À L'EXTRACTION

Vue d'ensemble du déblai au moment des études

D'après Duverger *et al.* **[2]**, les argiles à graviers se présentent comme une matrice « d'argile surconsolidée, plus ou moins limoneuse et sableuse, de couleur rougeâtre, (...) traversée par des chenaux sableux ou caillouteux riches en galets quartzeux ou micaschisteux. »

En pratique, au moment des études, les sondages mettaient en évidence un milieu relativement hétérogène, constitué d'un enchevêtrement de matériaux de classes C_1A_1/A_2 à B_5/B_6 au sens du guide technique « Réalisation des remblais et des couches de forme » (GTR) **[3]**, sur des épaisseurs métriques à décimétriques. Aucune continuité n'apparaissait d'un sondage à l'autre, ce qui laissait envisager une structure lenticulaire, et empêchait l'établissement d'un profil en long géotechnique véritablement représentatif. Pour estimer les volumes au déblai, une méthode d'analyse statistique avait été proposée par Mieussens **[4]**, en extrapolant les résultats ponctuels d'essais à des couches fictives significatives, et en considérant que chaque sondage n'est représentatif que de la mi-distance le séparant des sondages situés de part et d'autre.

La **figure 1**, tirée de cette analyse, montre bien la dispersion des caractéristiques du sol au sein du déblai D6 qui a fourni le matériau d'apport du chantier expérimental. Ces estimations n'ont malheureusement pas pu être confirmées à l'ouverture du déblai car les volumes de matériau terrassés par classe et par état hydrique n'ont pas été répertoriés par l'entreprise qui a réalisé les travaux.

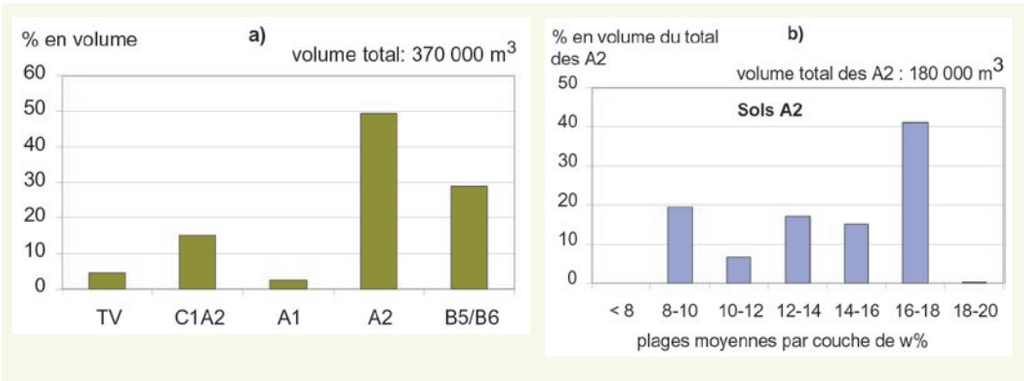


figure 1
Caractéristiques du sol au sein du déblai D6 :
a : Pourcentages volumiques estimés des différentes familles de sol
b : Répartition estimée des teneurs en eau (w %) pour les sols A2 (d'après **[4]***)*

Principaux paramètres d'identification des matériaux

Le **tableau 1** récapitule les caractéristiques de trois types de matériau rencontrés dans le déblai D6. Ce tableau appelle plusieurs commentaires. Tout d'abord, il met en évidence des différences marquées (en particulier sur les références Proctor) entre les sols A_2 et B_6 alors que visuellement, parmi les argiles à graviers, ces formations sont peu aisées à distinguer. Ce constat n'est pas sans conséquence. En effet, au cours du chantier voire des études, la qualification d'un sol se fait fréquemment par son appréciation visuelle (rattachement à une famille), d'une part, et par sa teneur en eau, d'autre part. Or, l'état hydrique d'un sol se qualifie par l'écart entre sa teneur en eau réelle et sa teneur en eau de référence (celle de l'optimum Proctor w_{OPN}). Se « tromper » de famille conduit donc à se « tromper » de valeur de w_{OPN} et donc à faire une erreur sur l'état hydrique, qui conditionne les techniques de réemploi.

Ces observations soulignent l'intérêt, dans les formations hétérogènes, de critères de décision basés sur les valeurs d'indice portant immédiat (IPI), plus resserrées, plutôt que sur les teneurs en eau.

Il est par ailleurs intéressant de constater la différence importante apparaissant dans la qualification de la fraction 0–2 µm entre la granulométrie laser (appareil Coulter LS200) et la sédimentomé-

Tableau 1
Valeurs moyennes des principaux paramètres d'identification mesurées sur quelques sols issus du déblai D6

	Sol meuble B_6 (d'après [4])	Sol meuble A_2 (d'après [4])	Sol induréA_2 (après déstructuration)
Passant à 2 mm	44 %	80 %	86 %
Passant à 80 µm	16 %	47 %	55 %
$\frac{\text{Passant à 2 µm}}{\text{Passant à 80 µm}}$ (laser)	12 %	12 %	13 %
$\frac{\text{Passant à 2 µm}}{\text{Passant à 80 µm}}$ (sédimentométrie)	*Non mesurée*	*Non mesurée*	38 %
Limite de liquidité w_L	43 %	45 %	35 %
Limite de plasticité w_P	32 %	24 %	19 %
Indice de plasticité IP	11	21	16
Valeur au bleu VBS	0,99	2,96	3,58
Masse volumique des grains ρ_s	*Non mesurée*	*Non mesurée*	2 720 kg/m³
Caractéristiques Proctor :			
– masse volumique sèche ρ_{dOPN}	1 980 kg/m³	1 800 kg/m³	1 840 kg/m³
– teneur en eau w_{OPN}	11,0 %	16,7 %	15,7 %
– IPI à w_{OPN}	13	13	13
– IPI à w_{OPN} – 1.5 %	26	19	22
– IPI à w_{OPN} + 1.5 %	≈ 3	7	6
– Gonflement CBR à w_{OPN}	0,0 %	1,5 %	1,9 %
– Gonflement CBR à w_{OPN} – 1.5 %	0,0 %	2,3 %	3,4 %
– Gonflement CBR à w_{OPN} + 1.5 %	0,0 %	0,9 %	0,9 %

trie. En considérant que la mesure par sédimentométrie constitue la référence, on constate que le granulomètre laser propose des valeurs nettement sous évaluées. Ces résultats viennent confirmer les observations antérieures d'équipes anglo-saxones **[5]** et suisses **[6]** qui avaient montré pour les granulomètres laser Malvern 3600 E et Coulter LS100 des taux de détection des particules argileuses 0–2 µm assez faibles (entre 25 % et 40 % des valeurs fournies par la sédimentométrie, ce qui correspond à nos mesures). Une bonne correspondance a en revanche été constatée sur des tailles de particules plus élevées (10 µm et au-delà).

Constats réalisés à l'ouverture du déblai

Pendant la réalisation du chantier expérimental, l'ouverture du déblai D6 a confirmé la dispersion importante des classifications GTR et des teneurs en eau par famille de sol. Dans l'ensemble, le matériau a toutefois pu être mis en œuvre avec des états hydriques moyens à humides (*m* à *h*), en dehors des zones indurées pour lesquelles des états secs à moyens (*s* à *m*) ont été reportés. Ces zones indurées ne sont apparues que sous forme de lentilles compactes réparties irrégulièrement dans le déblai, d'un faible volume au total.

Si l'on se réfère aux caractéristiques physiques mentionnées dans le **tableau 1**, en particulier pour les sols A_2, ces constats ne s'accordent pas avec les estimations de la **figure 1**, issue des études de projet, qui laissaient envisager une proportion importante de matériaux secs. Plusieurs explications peuvent être avancées :

– le brassage lié à la méthode d'extraction (frontale, par couches de 2 à 3 m) a conduit à une homogénéisation du matériau, lissant ainsi les écarts de teneur en eau ;

– durant les études, un stockage des carottes inadapté peut avoir favorisé une dessiccation avant la réalisation des essais de laboratoire, d'où des teneurs en eau erronées ;

– pour les sols C_1xx, la forte proportion de graves impose des quantités importantes de matériau afin que la mesure de teneur en eau soit représentative. Un volume insuffisant peut conduire à des mesures inexactes ;

– enfin, du fait des difficultés de distinction visuelle des matériaux A_i et B_i sur ce projet et des forts écarts de référence Proctor mentionnés précédemment, comme les études étaient principalement basées sur des valeurs de teneur en eau, il est tout à fait possible que des sols B6m par exemple aient été classés par erreur en A_2ts. À nouveau, des études basées sur les valeurs d'IPI auraient probablement permis de mieux qualifier la formation hétérogène des argiles à graviers.

Dans l'ensemble, l'extraction des zones indurées a pu se faire à la pelle mécanique, l'opérateur s'efforçant en outre de briser les blocs indurés entre deux arrivées de tombereaux. Il a fallu attendre le fond du déblai pour identifier une lentille indurée de plusieurs centaines de m^3 présentant les difficultés attendues d'extraction et de mise en œuvre et permettant de réaliser les planches d'essai (voir plus loin). Les observations sur le reste de la déviation ont toutefois montré *a posteriori* que des quantités assez importantes de matériaux indurés pouvaient apparaître dans d'autres déblais.

LE REMBLAI EXPÉRIMENTAL

Dans l'optique du suivi à long terme du comportement d'un remblai de grande hauteur constitué d'argiles à graviers, la partie basse du remblai dit « du Marlenc » a été instrumentée. Les variations d'état hydrique au cours du temps étant l'une des causes principales des mouvements lents des remblais argileux **[7]**, les appareillages mis en œuvre ont visé à évaluer les évolutions des teneurs en eau et des déformations.

Configuration générale de la zone instrumentée

Le remblai expérimental permet le franchissement du thalweg hébergeant le ruisseau de Marlenc. Il est donc traversé par un ouvrage hydraulique Φ3 000 (OH4B) en béton. Les assises de l'ouvrage et du fond de remblai sont principalement constituées d'affleurements du substratum micaschisteux et sont donc saines. Au niveau des transitions avec les déblais, les venues d'eau constatées en cours de chantier ont été captées par la pose de nappes de géosynthétique drainant (microtubes) débouchant sur un drain. Au contact du versant, le remblai a été traité à la chaux sur une épaisseur de 2 mètres. Il n'y a en revanche pas eu de redans réalisés par l'entreprise.

La construction du remblai expérimental s'est déroulée en deux phases, séparées d'environ un an, résumées sur la **figure 2**. Cela a permis d'isoler la phase d'instrumentation (phase 1) du terrassement de la section courante de la déviation (phase 2), et donc de disposer de davantage de souplesse sur les cadences de construction pour la pose des appareillages.

L'instrumentation se compose de deux profils séparés d'environ 3,50 m, positionnés de sorte à permettre la mesure des évolutions hydriques et géométriques du talus :
– un profil de suivi des teneurs en eau, équipé de sondes TDR (*Time Domain Reflectometry*) ;
– un profil de suivi des déformations, équipé de tubes inclinométriques et d'extensomètres enregistrés.

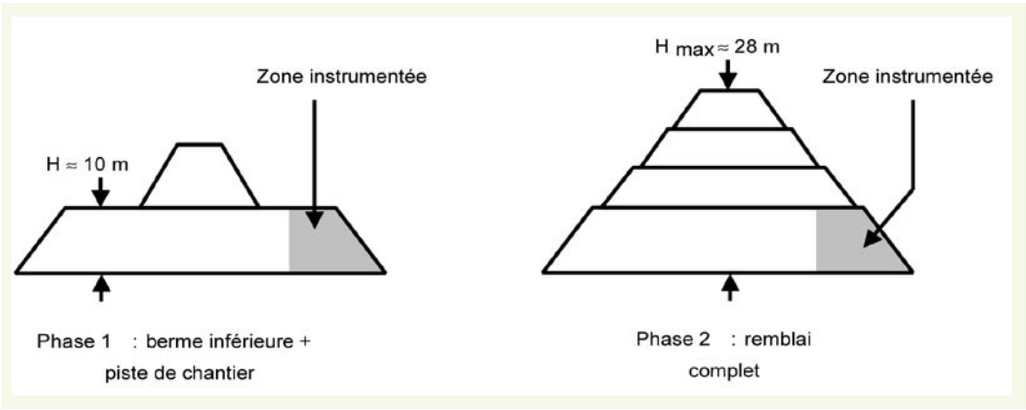


figure 2
Phasage de la construction du remblai expérimental.

Des mesures de panneau électrique ont en outre été réalisées sur la zone.

La constitution du remblai expérimental a été conditionnée par les matériaux rencontrés au fur et à mesure de l'ouverture du déblai D6 (pas de sélection particulière). Ainsi, d'après les prélèvements effectués en cours de construction, la structure de la zone instrumentée est approximativement la suivante :
– terrain naturel (TN) → TN + 1 m : matériau A2 ;
– TN + 1 m → TN + 5 m : mélange de matériaux A1, A2, B5, B6 ;
– TN + 5 m → TN + 9,50 m : matériau A2, parfois induré.

Les couches ont pu être compactées en l'état, suivant les prescriptions du GTR, du fait de la quasi-absence de matériaux secs ou très secs pendant la phase de construction (voir ci-avant).

Le suivi des teneurs en eau par sondes TDR

› Principe de la mesure

La méthode TDR permet une mesure indirecte de la teneur en eau volumique du sol. Quoiqu'utilisée depuis plusieurs années en laboratoire, elle a été jusqu'à présent peu appliquée à des ouvrages réels. On reprend ici les explications de Alimi-Ichola *et al.* **[8]** sur la méthode TDR : « La méthode TDR est basée sur la mesure du temps de parcours (t) et de l'atténuation de l'amplitude d'une onde électromagnétique envoyée le long d'une ligne de transmission (...). Le principe de la mesure est développé par Topp *et al.* (1980) **[9]**, qui ont montré que pour plusieurs types de sols, il existe une relation générale empirique $\theta = f(\varepsilon)$qui relie la teneur en eau volumique θ (m^3/m^3) et la constante diélectrique du sol ε (...). La constante diélectrique est obtenue à partir du temps de transit (t) d'une onde électromagnétique à travers le sol, le long de la sonde (...) ».

Pour l'instrumentation du remblai du Marlenc, le système utilisé est celui proposé par la société « Trase », composé d'un guide d'onde « fourchette » à trois branches (voir **figure 3**), d'environ 20 cm de longueur, relié par des câbles coaxiaux à une centrale de mesure.

› Mise en œuvre des sondes

Il existe à notre connaissance peu de retours d'expérience sur la mise en œuvre *in situ* de sondes TDR, en particulier dans le cas d'un remblai routier. On propose ici une méthode de pose, conçue en collaboration avec le Centre d'expérimentation routière (CER) de Rouen, applicable à tout ouvrage en terre en cours de construction. Elle pourrait par exemple être appliquée à des digues.

Les différentes étapes sont les suivantes, illustrées sur la **figure 3** :
– Préparation préalable en laboratoire :
- assemblage des différents câbles et gainage ;
- raccord des câbles à la sonde et colmatage au mastic des extrémités des gaines ;
- réalisation d'une mesure test pour vérifier le fonctionnement du système.

– Sur chantier, mise en place de la sonde TDR à la position requise, à même le sol, sur la dernière couche compactée par le terrassier.
– Fixation de la sonde TDR au sol avec une broche et déroulement du câble gainé avec une ondulation, de sorte à éviter la rupture ou le poinçonnement lors du compactage. Les câbles sont ensuite amenés à une buse « trou d'homme » percée.
– Dépôt de la longueur de câble restante dans la buse trou d'homme et étiquetage durable du câble indiquant à quelle sonde il est relié.
– Levé de la position X-Y-Z de la sonde par un topographe.
– Mise en place d'un peu de matériau fin (sans éléments indurés qui pourraient abîmer la sonde lors du compactage) sur la sonde TDR. Le matériau déposé sur la sonde doit être le même que celui présent à ce niveau dans le remblai.
– Prélèvement de matériau remanié au niveau de la sonde pour essais en laboratoire (teneur en eau, granulométrie, VBS, point Proctor).

figure 3
Illustration des principales étapes de pose des sondes TDR in situ :
a : Sonde TDR mise en place
b : Sonde recouverte de matériau fin
c : Remontée des câbles coaxiaux gainés dans la buse trou d'homme
d : Mise en œuvre de la couche de remblai supérieure.

– Réalisation d'une mesure « test » pour vérifier le fonctionnement de la sonde et du câblage.
– Mise en œuvre et compactage de la couche supérieure de remblai.
– Mesure « initiale » (parfois réalisée lors de la pose des sondes du niveau immédiatement supérieur).

Cette méthode a été appliquée avec succès pour la pose des 25 sondes TDR du remblai expérimental. Une seule a connu une avarie suite à ces opérations. Une instrumentation de ce type constitue toutefois une contrainte de chantier importante, qu'il est préférable de prendre en compte dès le stade de l'appel d'offres.

En complément, puisque les sondes TDR fournissent des teneurs en eau volumiques, on notera qu'il peut être nécessaire de prélever des échantillons intacts dans les couches de remblai pour effectuer des mesures de masse volumique et ainsi déduire les teneurs en eau massiques.

$$w^{m} = \frac{\rho_w}{\rho_d} w^{vol}$$

avec : w^{m} : teneur en eau massique
w^{vol} : teneur en eau volumique
ρ_w : masse volumique de l'eau
ρ_d : masse volumique sèche du sol.
La **figure 4** montre la configuration du profil instrumenté en suivi des teneurs en eau en fin de chantier, superposé au profil de suivi des déformations.

› Quelques résultats issus des sondes TDR

L'évolution des teneurs en eau volumiques relevée sur les sondes 2, 4, 8, 19 et 23 est représentée à titre d'exemple sur la **figure 5**.

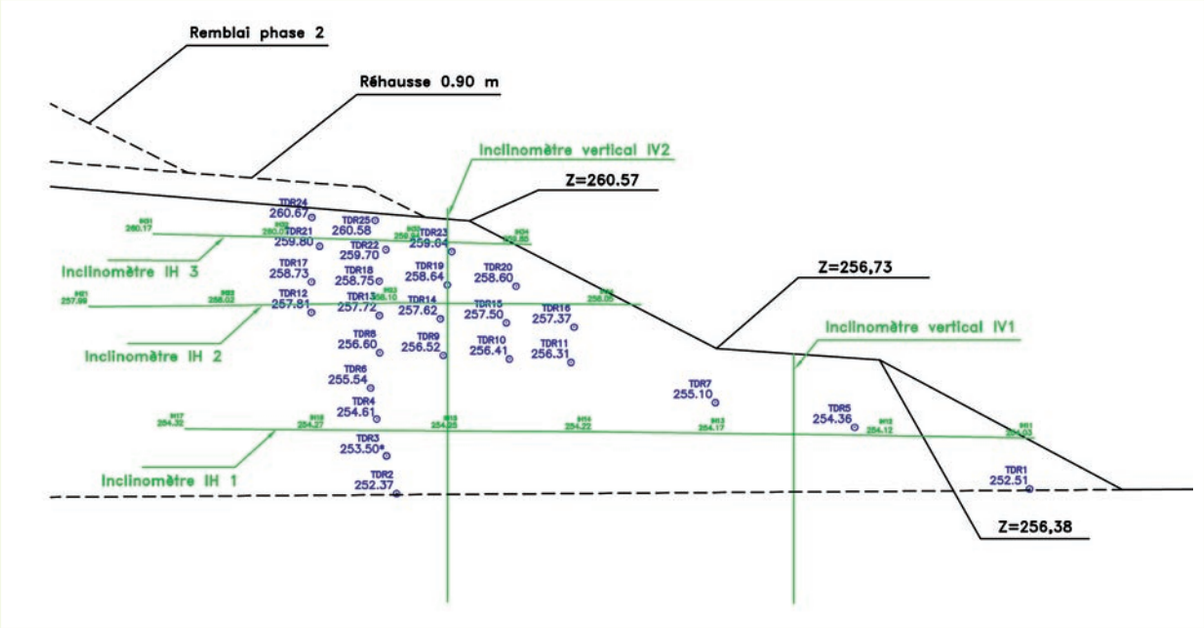


figure 4
Vue superposée des deux profils instrumentés : suivi des teneurs en eau (en bleu) et suivi des déformations (en vert).

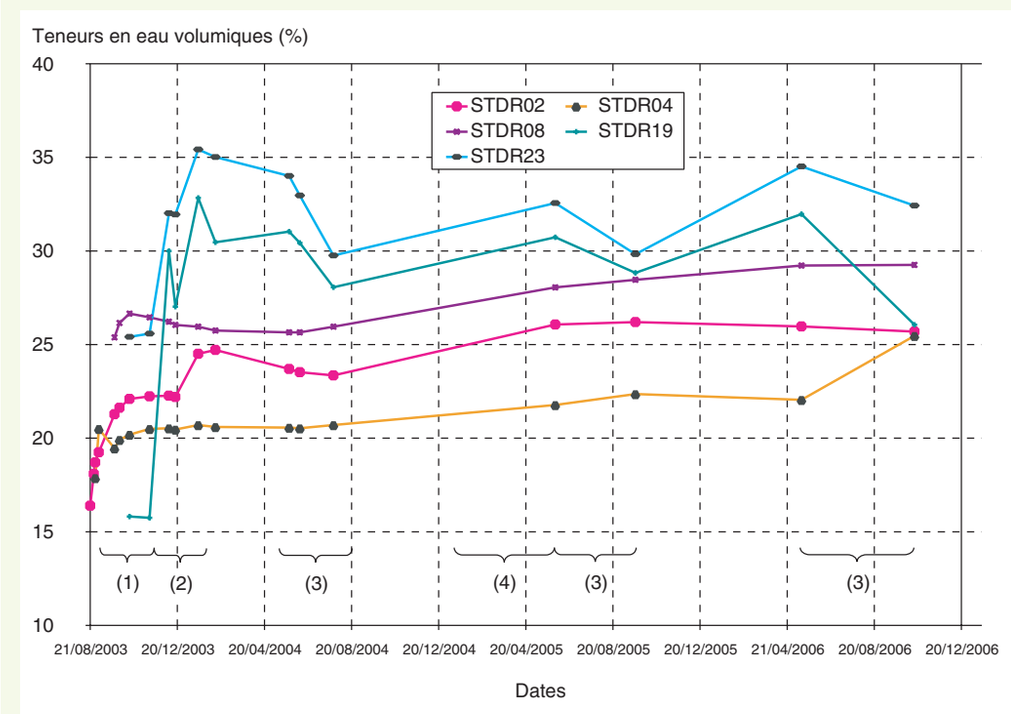


figure 5
Évolution des teneurs en eau volumiques sur les sondes TDR. 2 – 4 – 8 – 19 – 23.

Sur cette figure, différentes phases, numérotées de 1 à 4, apparaissent particulièrement intéressantes :

❶ *Construction du remblai expérimental* : la montée des couches supérieures du remblai conduit à une densification complémentaire des couches inférieures, qui se traduit par une augmentation de la teneur en eau volumique, sans qu'il y ait nécessairement d'évolution réelle de la teneur en eau massique ;

❷ *Rééquilibrage des teneurs en eau :* comme cela apparaît sur la **figure 3**, les sondes TDR ont été recouvertes au moment de la pose d'un peu de matériau de remblai, pour bien les stabiliser avant la mise en œuvre de la couche supérieure. Cette fine couche de sol a été particulièrement exposée

à l'évaporation (fortes chaleurs de l'été 2003) et était donc vraisemblablement dans un état sec au moment où elle a été recouverte. La mesure effectuée par la sonde TDR n'étant représentative que de son voisinage immédiat, les fortes évolutions relevées dans la période (2) traduisent donc le rééquilibrage progressif des teneurs en eau avec le reste du remblai.

❸ *Périodes estivales* : la figure met en évidence un phénomène de dessiccation estivale, qui ne se manifeste que sur les sondes les plus proches de la surface (sondes 19 et 23 soit les deux mètres supérieurs). Les autres sondes montrent une relative stabilité (en dehors de la sonde 4 qui indique une nette augmentation de teneur en eau entre mai et octobre 2006, encore inexpliquée). Quantitativement, on constate qu'à deux mètres sous la surface, cette dessiccation se traduit en trois mois par une chute de teneur en eau volumique allant de 2 à 6 % ce qui, en se référant à la masse volumique de l'OPN (*Optimum Proctor Normal*), correspond à une différence de teneur en eau massique de 1,1 à 3,3 %.

❹ *Construction de la partie supérieure du remblai (phase 2)* : une légère augmentation des teneurs en eau volumiques est observée, correspondant probablement à une densification du matériau de remblai.

Les informations fournies par les sondes TDR sont donc cohérentes avec l'évolution attendue du remblai à court terme. Quantitativement, les ordres de grandeur obtenus semblent satisfaisants. Les mesures permettent en outre de dégager deux tendances comportementales notables sur l'évolution des états hydriques au cours du temps dans un remblai argilo-limoneux :

– la résultante des variations relevées semble s'orienter vers une augmentation progressive de la teneur en eau, ce qui pourrait témoigner d'une composante irréversible lors des cycles saisonniers de séchage et d'humidification. Si cette observation se confirme, l'instrumentation permettra sur le long terme d'évaluer le développement d'une frange saturée et d'examiner son influence sur les déformations ;

– la teneur en eau massique connaît des variations saisonnières très significatives même à deux mètres sous la surface. Cela peut revêtir une importance particulière dans un contexte classique de bords de talus mal compactés ou particulièrement sensibles à des mouvements de reptation par exemple (voir **[7]**).

Un suivi sur le long terme reste nécessaire pour confirmer ces observations, appréhender véritablement les liens avec la pluviométrie et éclaircir certains comportements surprenants (sonde 4 e.g.).

Les mesures de panneau électrique

L'objectif des mesures de panneau électrique était d'identifier si cette technique de mesure était adaptée pour retranscrire les variations de teneur en eau dans le remblai au cours du temps. Pour cela, 25 électrodes ont été implantées tous les mètres le long du profil en travers du remblai expérimental. Cela a permis de couvrir la même zone que celle suivie par les sondes TDR, afin si possible de réaliser des comparaisons entre les résultats issus des deux méthodes.

La principale difficulté rencontrée a été d'assurer la reproductibilité des mesures sur un remblai récent donc soumis à des phénomènes de ravinement et de croissance de la végétation. L'influence sur les valeurs de résistivité des légères variations de géométrie en résultant reste difficile à évaluer.

Au final, il ressort que les mesures de panneau électrique sont, dans le cas du remblai expérimental de Carmaux, peu efficaces pour caractériser l'évolution des teneurs en eau :

– la température influence sensiblement les résultats, mais il n'a pas été possible de la prendre en compte du fait de l'absence de capteurs de température dans le remblai ;

– la relative hétérogénéité du remblai, liée aux variations naturelles des caractéristiques des argiles à graviers, conduit à des valeurs de résistivité assez dispersées et difficiles à interpréter ;

– les variations de teneur en eau liées aux phénomènes saisonniers étaient globalement assez faibles sur la période de mesure (de l'ordre de 2 % d'après les sondes TDR), ce qui n'était pas suffisant pour obtenir des évolutions significatives au regard des incertitudes recensées.

En l'état actuel des connaissances et des techniques, les mesures de panneau électrique semblent encore peu adaptées au suivi dans un remblai réel de l'évolution naturelle des teneurs en eau. Elles devraient, en revanche, être plus efficaces pour des mesures sur des ouvrages expérimentaux dans lesquels l'homogénéité du matériau est mieux assurée et un suivi des températures est réalisé, ou pour des digues où les variations d'état hydrique sont susceptibles d'être plus importantes.

Le suivi des déformations

Les variations de teneur en eau au sein d'un remblai argilo-limoneux conduisent à de multiples phénomènes pouvant à terme se traduire par des mouvements incompatibles avec la fonction de l'ouvrage. Par exemple, Mieussens **[1]** répertorie les mécanismes suivants :
– les phénomènes cycliques de gonflement et retrait ou de variations de succion induisant une reptation de talus ;
– la modification sous imbibition de la résistance au cisaillement du sol non saturé ;
– l'effondrement sous imbibition ;
– l'évolution granulométrique de blocs indurés insuffisamment déstructurés avant mise en œuvre.

En parallèle du suivi des teneurs en eau présenté précédemment, il était donc particulièrement intéressant de mettre en place un suivi des déformations du remblai expérimental. Pour cela, un profil d'instrumentation inclinométrique, présenté en **figure 4**, a été mis en œuvre sur la zone expérimentale. Il est composé de deux tubes inclinométriques verticaux et de trois tubes horizontaux. Les tubes horizontaux ont été implantés en cours de construction du remblai, sur lit de sable nivelé, après réalisation d'une tranchée d'environ 70 cm de profondeur par le terrassier. La tranchée était ensuite comblée avec les matériaux du site et recompactée. Cette technique a permis une mise en œuvre tout à fait satisfaisante des tubes. Les inclinomètres verticaux ont été installés après la construction, en forage, suivant les recommandations de la norme NF P-94 156 **[10]**.

Chaque tube inclinométrique permet de mesurer les déformations perpendiculaires à son axe, avec une précision de l'ordre de 0,1 mm/m, ce qui est suffisant pour détecter les évolutions significatives du corps de remblai.

En complément, pour observer avec précision les mouvements verticaux affectant le remblai, trois extensomètres seront installés prochainement, au droit de la sonde TDR 24. Il s'agit de tiges rigides coulissant dans un tube souple et reliées à un capteur de déplacement d'une précision de l'ordre du 1/10e de mm. Une description sommaire en est donnée par Mieussens **[7]**. Ces appareillages permettent de suivre en continu l'évolution du remblai, avec une quantification précise des cycles saisonniers de gonflement et retrait et la possibilité de dégager la composante irréversible de ces mouvements.

Après trois ans de suivi inclinométrique, les résultats obtenus sont encore peu significatifs. En effet, la construction de la partie haute du remblai a induit des déformations supplémentaires parasites qui ne permettent pas de distinguer les évolutions propres de la zone instrumentée. On relève actuellement essentiellement un léger flambage des tubes verticaux ainsi qu'un enfoncement du fond des tubes horizontaux.

À nouveau, c'est le suivi sur le long terme qui permettra de tirer pleinement parti de cette instrumentation.

LES PLANCHES D'ESSAI

La construction du remblai expérimental, présentée dans les sections précédentes, a permis, d'une part, d'apprécier en vraie grandeur les conditions d'extraction et de mise en œuvre des argiles à graviers (structure lenticulaire du déblai, peu de matériaux secs, etc.) et, d'autre part, de créer un ouvrage instrumenté visant, à long terme, à améliorer la compréhension des mécanismes de déformation des remblais argileux.

Un autre objectif du chantier expérimental était de tester la mise en œuvre des matériaux les plus indurés et les plus secs du déblai D6, ce qui a été réalisé sous forme de planches d'essai.

Le matériau sélectionné et le protocole de réalisation des planches

Le matériau utilisé pour les planches d'essai est issu d'une lentille indurée dans un état hydrique *s* à *m* rencontrée en fond du déblai D6. À l'extraction, une pelle mécanique permettait de le débiter en blocs pouvant atteindre 800 mm. Les contraintes du chantier n'ayant pas permis un fonctionnement en flux tendu, un stockage provisoire a été nécessaire. Les matériaux ont été entreposés sous une bâche étanche immédiatement après extraction, sans chercher de fragmentation complémentaire ni de compactage, pour rester le plus représentatif possible des conditions de chantier.

En place, le matériau se rapproche d'une roche argileuse R_3 plus ou moins fragmentable. La moyenne des masses volumiques sèches mesurées sur des blocs intacts issus du déblai est de 1,96 t/m^3, avec des teneurs en eau allant de 12 à 17 %. Après déstructuration complète, les caractéristiques obtenues sont celles d'un matériau A_2 (**tableau 1**, colonne « sol induré A_2 »). Ainsi, le matériau quasiment saturé en place du fait de sa forte compacité présente après déstructuration un état hydrique sec à moyen.

Les principaux problèmes à aborder pour la mise en œuvre de ce sol induré sont les suivants :
– quel protocole adopter pour assurer une déstructuration « suffisante » (voir section ci-dessous) des blocs ?
– en fonction de la déstructuration obtenue, quelles caractéristiques retenir pour les préconisations de compactage ?
– comment gérer les sols secs ? Peut-on les humidifier avec des moyens économiquement acceptables pour ce chantier ? Peut-on les mettre en œuvre en l'état ?

Pour tenter d'y répondre, les planches d'essai suivantes ont été réalisées.

Les planches présentaient une longueur de 20 m et une largeur de 4 m, sauf P3 et P3bis pour lesquelles la largeur n'était que de 2 m. Elles ont été mises en œuvre dans des conditions météorologiques « ni pluie ni évaporation importante » au sens du GTR.

Chaque planche a fait l'objet de prélèvements remaniés après chenillage et, après compactage, de mesures de masse volumique à la double sonde et au GPV (gammadensimètre à pointe et à profondeur variable). En outre, des échantillons « intacts », directement représentatifs de l'état final de la couche, ont été taillés à la pioche dans les planches P1 et P2.

Les principaux résultats

› Les planches avec correction hydrique : P7 et P8

Ces planches d'essai correspondent à une mise en œuvre en couche épaisse (voir **tableau 2**). Pour apprécier l'efficacité du chenillage, deux critères ont été retenus :
– l'absence de blocs de dimensions supérieures aux 2/3 de l'épaisseur de la couche ;
– une répartition matrice fine / blocs non déstructurés visuellement satisfaisante, soit de l'ordre de 50 % de fines au minimum.

tableau 2
Description des planches d'essai réalisées dans le cadre du chantier expérimental.

Numéro de planche	Chenillage	Humidification après chenillage	Nombre de couches	Épaisseur (m)	Compacteur	Vitesse (km/h)	Nombre de passes par couche
P1	Bull. D6	Non	2	0,20	Vibrant V5	2	6
P2	Bull. D6	Non	2	0,20	Vibrant V5	2	10
P3	Bull. D6	Non	1	0,30	Vibrant V5	2	6
P3bis	Bull. D6	Non	1	0,30	Vibrant V5	2	10
P7	Bull. D7	Oui	1	0,45	Vibrant V5	Compactage impossible	
P8	Bull. D7	Oui	1	0,45	Vibrant V5		

Le premier constat effectué sur ces planches a été l'impossibilité de cheniller de manière satisfaisante le matériau en couches de 45 cm. En pratique, le matériau acquérait une bonne portance, pouvant être trompeuse, mais ne se déstructurait en fait véritablement que sur les cinq premiers centimètres, la partie inférieure restant à un stade d'enchevêtrement de blocs de dimensions importantes comme cela apparaît sur la **figure 6**. Plusieurs rippages complémentaires ont été nécessaires avant d'obtenir des dimensions de blocs véritablement satisfaisantes sur l'ensemble de la couche.

La correction hydrique a été effectuée avec des moyens sommaires, considérés comme économiquement acceptables par la maîtrise d'œuvre sur ce chantier : humidification au moyen d'une tonne à eau sans débit-mètre, rippage au bulldozer, maturation d'environ une heure, fermeture au bulldozer puis compactage. L'apport de teneur en eau massique, mesuré par des bacs au passage de l'arroseuse était de 2,8 %, ce qui est représentatif de la correction nécessaire pour passer d'un état sec à un état moyen sur ce type de matériau.

figure 6
Chenillage du matériau induré sur les planches P7 et P8 :
a : Quelques blocs à la sortie du tombereau
b : Blocs extraits par rippage après un premier chenillage par couches de 45 cm

a | b

À l'issue du protocole d'humidification, le matériau s'est révélé impossible à compacter. Après un jour de maturation supplémentaire, des saignées ont été effectuées dans les planches afin de réaliser des prélèvements. Les 20 cm supérieurs révélaient un matériau humide, plastique. Les mesures de teneur en eau ont montré que dans cette couche le sol avait subi une correction hydrique $\Delta w \approx 5$ à 6 %. En dessous, le matériau semblait quasiment intact et les mesures de teneur en eau ont indiqué $\Delta w \approx 0{,}0$ %.

Les planches P7 et P8 montrent donc que la mise en œuvre des argiles à graviers A_2 indurées en couches d'épaisseur moyenne (45 cm) n'est pas réaliste. D'une part l'obtention d'une mouture correcte par chenillage est particulièrement délicate (plusieurs rippages additionnels sont nécessaires) et d'autre part, lorsque le matériau nécessite une correction hydrique, cette dernière ne peut être obtenue avec des moyens sommaires. Pour ce type de sol, un traitement à l'eau ne serait envisageable qu'avec des techniques plus lourdes, comme l'usage d'une arroseuse-enfouisseuse et d'un pulvérisateur de sol, ou avec un processus de dépôt-reprise permettant un brassage et des temps de maturation longs.

› Les planches P1 et P2 (couches de 20 cm)

Ces planches sont composées de deux couches superposées de 20 cm d'épaisseur, en matériaux issus du stock provisoire. Pour obtenir une mouture de l'ordre de 0-100 mm **(figure 7)**, il a été nécessaire de procéder à un chenillage intense (10 à 15 passes de bulldozer D6), sans rippage com-

plémentaire toutefois. Le compactage a été ensuite réalisé au moyen d'un vibrant V5. Chacune des deux couches de 20 cm a été élaborée suivant le même protocole.

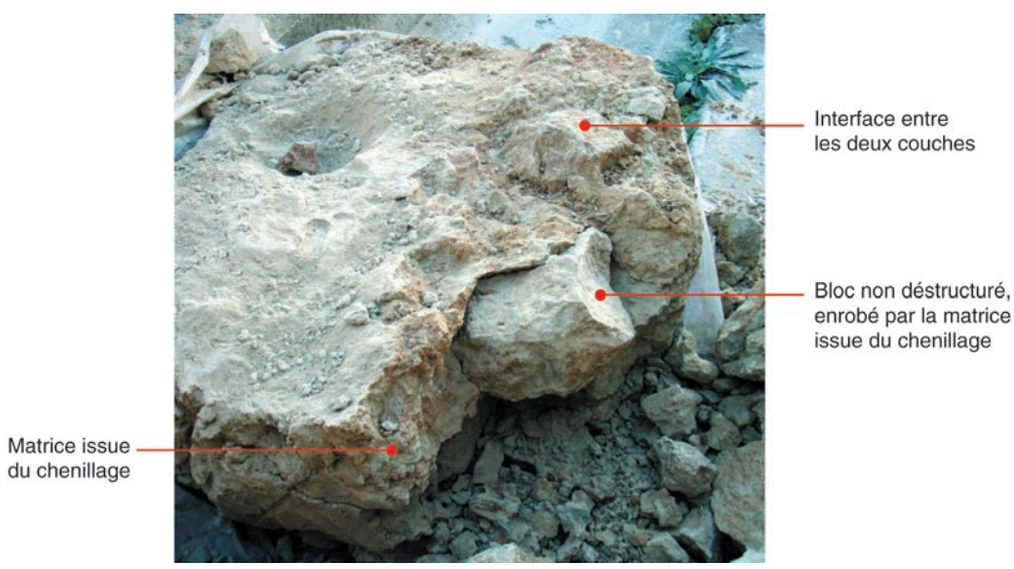
Sur ces deux planches, les mesures de teneur en eau réalisées ont montré que le matériau était dans un état généralement sec pour la couche inférieure (teneurs en eau comprises entre 11,9 et 14,4 %) et généralement moyen pour la couche supérieure (teneurs en eau comprises entre 14,1 et 15,9 %).

figure 7
Chenillage et compactage de la planche P1 :
a : Obtention d'une mouture satisfaisante après chenillage sur la planche P1
b : Planche P1 (couche inférieure) après compactage

a | b

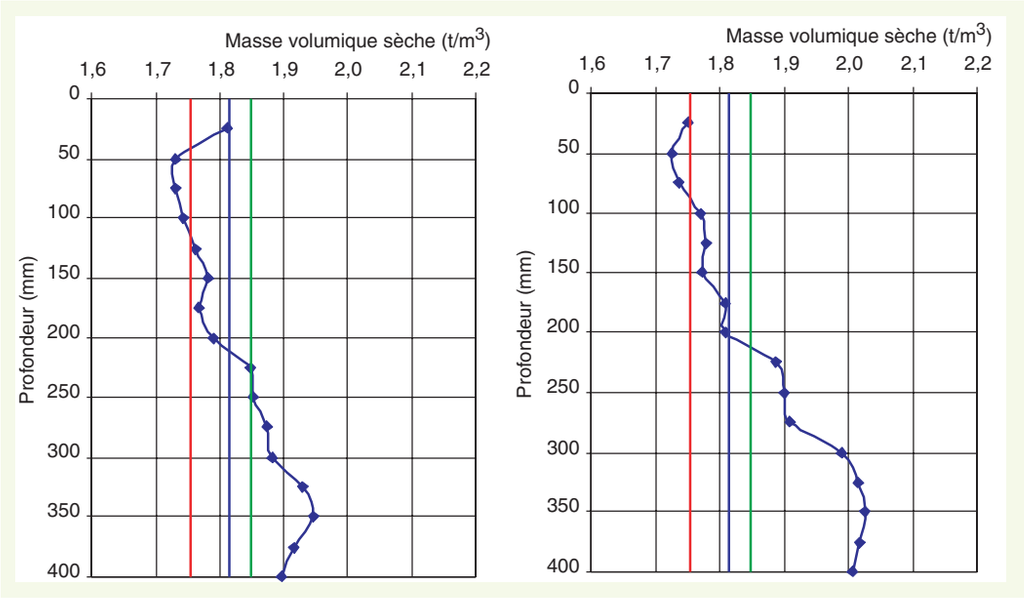
L'ouverture des échantillons intacts prélevés à la pioche a permis d'examiner plus précisément la structure des couches et de réaliser des mesures de masse volumique en laboratoire. De manière générale (voir **figure 8**), les quelques blocs non déstructurés subsistant au sein de la couche apparaissaient bien enrobés par la matrice issue du chenillage. Les plus gros blocs présentaient une dimension maximale $D_{max} \approx 120$ mm, ce qui est satisfaisant au regard de l'épaisseur de la couche. En termes quantitatifs, les blocs non déstructurés ne représentaient que 15 % de la masse totale de l'échantillon intact. Les masses volumiques sèches, mesurées par immersion sur l'échantillon issu de la planche P1, ont fourni des valeurs comprises entre 1 900 et 2 020 kg/m^3 pour les blocs non déstructurés et comprises entre 1 820 et 1 980 kg/m^3 pour la matrice. On notera que lors de son ouverture, l'échantillon s'est naturellement scindé à l'interface entre les deux couches mises en œuvre, ce qui confirme qu'un remblai, même en matériau sélectionné, ne peut être véritablement

figure 8
Ouverture de l'échantillon intact prélevé sur la planche P1.



considéré comme isotrope. Ainsi, au cours de la vie du remblai, on pourra s'attendre à des effets d'interface se répercutant par exemple sur les perméabilités ou sur le comportement mécanique.

Du fait de la très bonne déstructuration des blocs indurés obtenue sur ces planches, le comportement au compactage a pu être analysé sur la base des références Proctor fournies dans le **tableau 1**. Des mesures de masse volumique à la double sonde ont donc été réalisées, dont deux résultats typiques sont représentés sur la **figure 9**.



a | b

figure 9
Exemples de résultats obtenus à la double sonde sur les planches P1 et P2 (trait vert : ρ_{dOPN} ; trait bleu : 0,98 ρ_{dOPN} ; trait rouge : 0,95 ρ_{dOPN}).
a : Planche P1, couches de 20 cm, 6 passes de V5.
b : Planche P2, couches de 20 cm, 10 passes de V5.

Les courbes obtenues ne mettent pas en évidence la variation classique de masse volumique sèche au sein de l'épaisseur compactée (pas de chute de masse volumique en fond de couche notamment, voir **[3]**). Cela est vraisemblablement lié à la présence aléatoire dans chaque couche de blocs non destructurés, de masse volumique élevée. Par ailleurs, il est intéressant d'observer que les masses volumiques relevées sont systématiquement plus importantes dans la couche inférieure (20–40 cm) : cela semble indiquer que le compactage de la couche supérieure a contribué à améliorer la densification de la couche sous-jacente. Enfin, les chutes de masse volumique parfois observées sur les premiers centimètres sont attribuables à des phénomènes de feuilletage, constatés visuellement durant la mise en œuvre des planches d'essai **(figure 7)** et qui pourraient être évités sur le chantier en utilisant des compacteurs à pieds dameurs par exemple.

Ces relevés à la double sonde permettent de se prononcer sur la qualité du compactage obtenu. Les valeurs retenues sont celles de la couche inférieure, davantage représentatives des conditions du corps de remblai. Les deux méthodes de compactage testées permettent d'obtenir des masses volumiques supérieures à la référence Proctor et apparaissent donc tout à fait satisfaisantes au regard des exigences de densification du GTR. La planche P2 permet même d'obtenir des masses volumiques équivalentes à celles des blocs intacts, ce qui signifie qu'un état de quasi-saturation, correspondant à la masse volumique *in situ*, a été atteint. Il s'agit du cas « idéal », où le matériau sera le moins susceptible d'évolutions sous imbibition (en particulier dans un cas de remblai de grande hauteur), mais la solution de la planche P1, techniquement acceptable au regard des enjeux et contraintes du projet, reste plus pertinente économiquement.

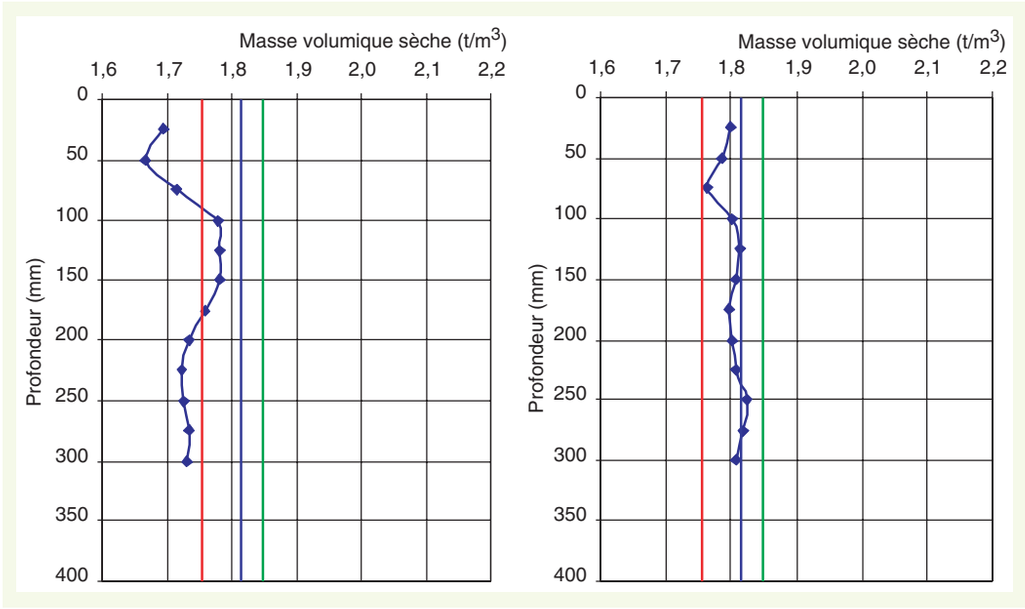
› Les planches P3 et P3bis (couches de 30 cm)

Les planches P3 et P3bis ne comprennent qu'une couche de 30 cm d'épaisseur. Une mouture 0-200 mm, satisfaisante, a pu être obtenue au chenillage en 8 à 10 passes de bulldozer. À nouveau, le compactage a été réalisé au moyen d'un vibrant V5.

Les mesures de teneur en eau ont mis en évidence des états hydriques moyens pour ces deux planches d'essai (teneurs en eau comprises entre 14,5 et 15,9 %).

Les masses volumiques mesurées à la double sonde sur ces planches sont résumées sur la **figure 10**.

À nouveau, on n'observe pas ou peu la classique baisse de masse volumique en fond de couche. Les valeurs relevées sont plus faibles que sur les planches P1 et P2. Plus précisément, pour la planche P3, la masse volumique moyenne est légèrement inférieure à 0,95 ρ_{dOPN} et la masse volumique minimale est inférieure à 0,92 ρ_{dOPN}. La qualité q4, au sens du GTR, n'est pas atteinte. Pour la planche P3bis, les valeurs obtenues sont comprises entre 0,96 et 0,99 ρ_{dOPN} et se rapprochent de la qualité q3.



a | b

figure 10
Exemples de résultats obtenus à la double sonde sur les planches P3 et P3bis (trait vert : ρ_{dOPN} ; trait bleu : 0,98 ρ_{dOPN} ; trait rouge : 0,95 ρ_{dOPN}). a : Planche P3, couche de 30 cm, 6 passes de V5. b : Planche P3 bis, couche de 30 cm, 10 passes de V5.

Éléments complémentaires : comportement à l'imbibition

Les matériaux de type A_2 comme ceux rencontrés dans les argiles à graviers de ce chantier, du fait de leur fraction argileuse, sont susceptibles de subir des phénomènes de gonflement et/ou d'effondrement sous imbibition en fonction de leur exposition aux venues d'eau et intempéries et de leurs conditions de mise en œuvre (compacité, teneur en eau). Ces mécanismes peuvent constituer une cause importante de pathologies à moyen terme, depuis la simple fissuration de la plate-forme jusqu'à des tassements importants ou des ruptures.

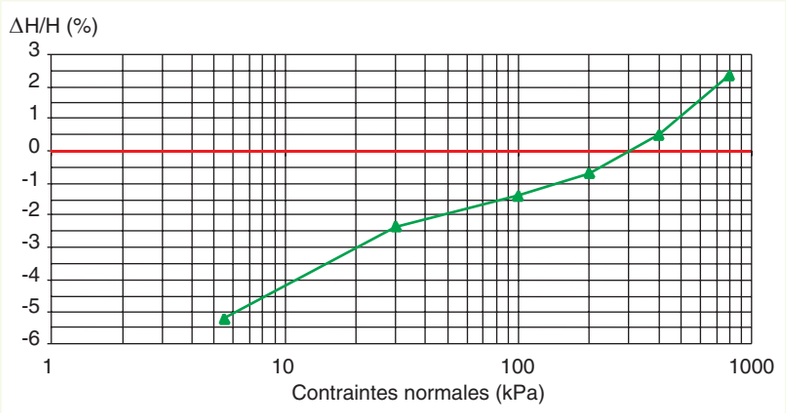
Le sol constituant le remblai étant non saturé, deux origines peuvent être distinguées pour le gonflement **[11]**. La première est liée à la diminution de succion lors de l'imbibition : des forces de répulsion se développent entre les particules **[12]**, conduisant à une expansion si la contrainte appliquée au sol n'est pas assez élevée pour les compenser **[13]**. La seconde origine du gonflement est minéralogique et dépend en premier lieu de la nature des argiles constitutives. Parmi les argiles les plus répandues (kaolinite, illite, smectite), seule la smectite peut véritablement être considérée comme gonflante. Le mécanisme microscopique du gonflement correspond alors à une interaction entre les feuillets d'argile, la molécule d'eau polaire et les ions se trouvant dans l'eau (des explications détaillées peuvent être trouvées dans **[11, 14]**). Dans le contexte de la déviation de Carmaux, des analyses minéralogiques ont montré que la proportion de smectite dans la fraction argileuse des sols A_2 était de l'ordre de 45 %.

En outre, lorsqu'un sol est insuffisamment compacté et/ou soumis à une contrainte forte, la chute de succion liée à l'imbibition permet un réarrangement des particules d'argile pouvant conduire à un phénomène d'effondrement. Ce dernier est susceptible de masquer tout ou partie du gonflement minéralogique.

Le développement de ces différents mécanismes dans les matériaux A_2 du chantier expérimental a été étudié au moyen d'essais de gonflement en parallèle à l'œdomètre. En pratique, des éprouvettes œdométriques ont été constituées par compactage semi-dynamique à la presse à partir de prélèvements totalement déstructurés issus de la planche d'essai P2, puis soumises à imbibition sous six contraintes différentes. Plusieurs teneurs en eau initiales et plusieurs taux de compactage ont été examinés sur ce projet. La **figure 11** ci-dessous montre à titre d'exemple les résultats obtenus pour un matériau compacté approximativement à l'OPN (ρ_d = 1,81 t/m^3) dans un état hydrique à la limite *s / ts* ($w \approx 11\ \% = 0{,}7\ w_{OPN}$). Elle permet d'identifier une pression de gonflement (pression annulant les déformations sous imbibition) de l'ordre de 300 kPa, avec une fourchette optimale de mise en œuvre entre 200 et 400 kPa (déformations inférieures à 1 %). Notons toutefois que la valeur de la pression de gonflement varie en fonction des caractéristiques initiales de l'éprouvette (teneur en eau, masse volumique).

En surface, ce matériau serait susceptible de gonflements de l'ordre de 5 à 6 %, ce qui n'est pas admissible en terme d'évolution à long terme du remblai.

figure 11
Déformation verticale sous imbibition d'éprouvettes œdométriques reconstituées soumises à différentes contraintes. Caractéristiques initiales des éprouvettes : $\rho_d \approx 1{,}81$ t/m^3, $w \approx 11$ %.



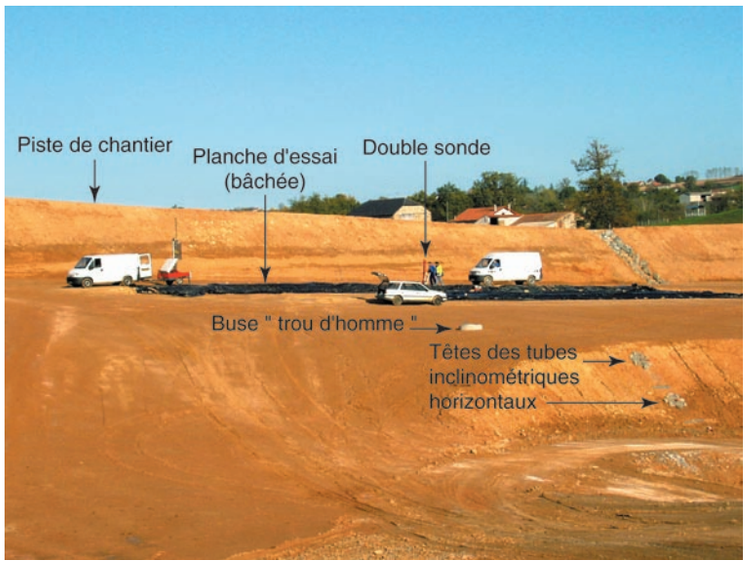
Synthèse : préconisations de mise en œuvre pour les argiles à graviers A_2 indurées

La démarche expérimentale adoptée dans le cadre de ce chantier permet donc de répondre à la problématique de l'extraction et du réemploi des argiles à graviers A_2 indurées.

Au niveau de l'extraction, l'usage d'une pelle mécanique de forte puissance apparaît pertinent pour les gisements lenticulaires. Toutefois, en cas de cubatures plus importantes, l'usage de moyens plus lourds (défonceuse, explosifs) n'est pas à exclure (hypothèse confirmée lors des travaux de la section courante).

Pour la mise en œuvre, un chenillage apportant une réduction granulométrique satisfaisante est possible avec des bulldozers de catégorie D6, sur des épaisseurs ne dépassant pas 30 cm. Pour des états hydriques *s* ou *m*, le compactage peut se faire par couches de 20 cm avec au moins six passes de compacteur vibrant V5 ou par couches de 30 cm avec dix passes du même compacteur. Notons que ces préconisations, plus contraignantes que celles du GTR pour des matériaux A_2 ou R_3, sont liées à la fois à la nature du matériau (les blocs non déstructurés par le chenillage nuisent au bon

figure 12
Vue d'ensemble du remblai expérimental en fin de phase 1.



compactage de la matrice) et à la nécessité, pour des remblais de grande hauteur, d'atteindre des niveaux de préconsolidation élevés.

Lorsque les matériaux sont secs, l'expérience réalisée montre que pour obtenir une humidification permettant d'atteindre un état moyen l'emploi de moyens lourds (arroseuse-enfouisseuse et pulvérisateur de sol par exemple) serait nécessaire. Il reste néanmoins possible de réutiliser ces matériaux en l'état sous 10 à 20 m de couverture pourvu que, comme l'ont montré les essais de gonflement en parallèle à l'œdomètre, l'on puisse atteindre des masses volumiques de l'ordre de 98 à 100 % de la référence Proctor. En pratique, sur ce chantier, de telles masses volumiques ont pu être obtenues en travaillant en couches de faible épaisseur comme mentionné ci-avant.

CONCLUSIONS

La réalisation d'un chantier expérimental a permis d'apporter une réponse à plusieurs interrogations majeures concernant le réemploi en remblai des argiles à graviers de la déviation de Carmaux. En particulier, ce travail a mis en évidence l'aspect lenticulaire et hétérogène de la formation ainsi que ses conséquences sur la classification des matériaux (en particulier leur état hydrique) et sur les prévisions de conditions de réemploi.

Il est courant d'évaluer pour une famille de matériaux les incertitudes sur l'état hydrique liées aux variations des teneurs en eau dans l'espace ou dans le temps. Il l'est moins de devoir s'interroger sur les incertitudes qui découlent des choix du rattachement de tel ou tel échantillon à une référence *Optimum Proctor*, c'est-à-dire à une famille de matériau. En effet, il ressort que lorsque la distinction visuelle est délicate, un même matériau de teneur en eau donnée est susceptible d'être interprété comme dans un état très sec ou au contraire dans un état moyen (au sens du GTR) en fonction de l'*Optimum Proctor* qu'on lui attribue de fait lors de son rattachement à une famille. Il s'agit alors d'un enjeu clé dans des formations aussi hétérogènes que les argiles à graviers.

Afin de fiabiliser les études et notamment la détermination de l'état hydrique, il faudrait envisager des démarches spécifiques pour les sols hétérogènes et fortement enchevêtrés du type de ceux rencontrés sur la déviation de Carmaux. L'expérience de ce chantier conduit à proposer la démarche suivante :
– réaliser des mélanges des matériaux de sondage, homogénéisés sur une hauteur de deux à trois mètres assimilable à la hauteur d'un front de taille à la pelle ;

– réaliser systématiquement une identification et des essais Proctor et indice portant immédiat (IPI) sur ces méta-familles, afin de décrire au mieux la variété des courbes de compactage Proctor et de résistance au poinçonnement des mélanges. Ceci permet de refléter le brassage de matériaux qui sera réalisé de manière inéluctable sur chantier ;
– établir, sur la base de ces essais, des critères de caractérisation de l'état hydrique. En cas de forte variabilité de la référence *Optimum Proctor* d'une méta-famille à l'autre, le degré de saturation, apprécié à partir d'un simple point Proctor à teneur en eau naturelle pourrait, par exemple, être un indicateur pertinent et relativement facile à utiliser en chantier pour mettre en évidence un état sec ou très sec. Au-delà d'une certaine valeur du degré de saturation (à définir sur la base de ces essais) marquant le passage à un état moyen, l'indice portant immédiat constituerait le critère d'évaluation de l'état hydrique, comme proposé par le GTR ;
– valider les critères choisis et la représentativité des hypothèses par des planches d'essai. Ce sera en particulier nécessaire pour des sols très secs, dont il faudra vérifier l'aptitude au compactage même sous une forte énergie.

Une telle démarche mériterait d'être testée sur un autre chantier avant d'envisager de la systématiser. Il est néanmoins certain que la réflexion sur la qualification de l'état hydrique mérite d'être approfondie dans les contextes hétérogènes et qu'elle doit être menée très en amont, afin d'assurer une bonne représentativité des études par rapport aux conditions d'exécution des terrassements.

Par ailleurs, pour le cas spécifique de sols A2 indurés et secs, qui posent à la fois des difficultés d'extraction, de mise en œuvre et d'évolution à long terme (gonflement, retrait), le chantier expérimental de Carmaux a permis d'établir des préconisations de réemploi plus adaptées aux spécificités du chantier que celles figurant dans le GTR.

Concernant la mise en œuvre, l'humidification des sols moyennement plastiques avec des moyens rustiques (queue de carpe) est apparue complètement irréaliste. Ceci confirme que seul l'emploi de moyens plus sophistiqués (enfouisseuse) et de dispositifs contraignants (malaxage systématique, humidification progressive...) peut permettre d'atteindre une humidification correcte. En revanche, il s'est avéré tout à fait possible de compacter les matériaux secs jusqu'à des masses volumiques élevées (qualité q3 voire plus) en adaptant les épaisseurs de couches et les énergies.

Concernant les risques d'évolution par imbibition, l'usage d'essais de gonflement en parallèle à l'œdomètre, peu habituel dans les études de terrassements, est apparu pertinent pour proposer un zonage des remblais de grande hauteur en fonction de l'état hydrique du matériau. En effet, ces essais permettent de prendre en compte l'effet de la contrainte appliquée au sol, contrairement aux essais de gonflement CBR (*California Bearing Ratio*) qui ne sont pertinents que pour représenter de faibles épaisseurs de matériau. À l'issue de ce chantier, il apparaît donc possible d'envisager le réemploi de sols secs voire très secs en cœur ou en base de remblai, à condition de se donner les moyens de qualifier précisément l'état hydrique et de compacter les matériaux avec une forte énergie.

Enfin, ce chantier constitue un retour d'expérience intéressant sur les méthodes d'instrumentation pour le suivi des teneurs en eau et des déformations dans les corps de remblai. En particulier, les sondes TDR fournissent des informations pertinentes sur les évolutions hydriques *in situ*, même si leur installation en cours de chantier reste contraignante vis-à-vis de la programmation des terrassements. Une méthodologie de pose a pu être proposée.

À long terme, le suivi de cet ouvrage expérimental permettra de mieux connaître l'évolution de l'état hydrique dans les corps de remblais en conditions météorologiques réelles. De plus, l'instrumentation des talus permettra d'observer le comportement de la frange de matériau la plus soumise aux cycles saisonniers de séchage et d'humidification.

Remerciements

Les auteurs souhaiteraient remercier la direction départementale de l'Équipement du Tarn, service grandes infrastructures, qui a assuré le pilotage des terrassements du chantier expérimental comme de la section courante de la déviation de Carmaux, a financé les matériels d'instrumentation et a favorisé les interventions du LRPC de Toulouse. Des remerciements sont également adressés à MM. Ferber et Auriol du LCPC ainsi qu'aux personnels du CER de Rouen pour l'assistance fournie dans la conception et la coordination du projet.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1 **Mieussens C.**, Les remblais en marne – Études, pathologies et techniques de réparations, texte de la conférence prononcée aux *journées du 70e anniversaire de la Junta Autonoma de Estradas*, Lisbonne, septembre **1997**, 18 pages.

2 **Duverger G.**, **Bedin A.**, *Route nationale 88 – Déviation de Carmaux – Étude géotechnique des terrassements généraux*, Rapport d'étude de la SORES pour la DDE du Tarn, **1998**, 36 pages.

3 **LCPC / Sétra**, *Guide technique : Réalisation des remblais et couches de forme* – Fascicules I et II, Réf. D92333, **1992**, 98 pages et 102 pages.

4 **Mieussens C.**, *Constatations sur une planche d'essai expérimentale en matériaux évolutifs*, Rapport de recherche, fiche 2.22.35.0, LRPC de Toulouse / LCPC, janvier **2002**, 38 pages.

5 **McCave I.N.**, **Bryant R.J.**, **Cook H.F.**, **Coughanowr C.A.**, Evaluation of a laser-diffraction-size analyzer for use with natural sediments, *J. Sedim. Petrol*, **1986**, **56**, 561-564.

6 **Loizeau J.-L.**, **Arbouille D.**, **Santiago S.**,**Vernet J.-P.**, Evaluation of a wide range laser diffraction grain size analyser for use with sediment, *Sedimentology*, **1994**, **41**, 353-361.

7 **Mieussens C.**, Déformations cycliques et irréversibles dans les remblais argileux, *Revue Française de Géotechnique*, **2000**, **90**, 47-59.

8 **Alimi-Ichola I.**, **Gaidi L.**, Étude de la migration du soluté d'un lixiviat dans un sol non saturé par la méthode TDR, *Revue Française de Géotechnique*, **2005**, **111**, 45-58.

9 **Topp G.C.**, **Davis J.L.**, **Amman A.P.**, Electromagnetic determination of soil water content : measurement in coaxial transmission lines, *Water Ressour. Res.*, **1980**, **16**, 574-582.

10 **Norme NF P-94 156**, *Mesures à l'inclinomètre – Annexe B : Scellement des tubes inclinométriques au coulis*, Afnor, **1995**, 25 pages.

11 **Serratrice J.-F.**, **Soyez B.**, Les essais de gonflement, *Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées*, **1996**, **204**, 65-85.

12 **Mieussens C.**, **Camapum de Carvalho J.**, *Remblais en marne – Désordre, étude, confortation*, document technique édité par Scétauroute et le Laboratoire central des ponts et chaussées, mars **1986**, 71 pages.

13 **Alonso E.**, Effet des variations de teneur en eau dans les sols compactés, *Revue Française de Géotechnique*, **1993**, **62**, 7-21.

14 **Ferber V.**, *Sensibilité des sols fins compactés à l'humidification – Apport d'un modèle de microstructure*, thèse de doctorat préparée L'École centrale de Nantes et à l'université de Nantes, **2005**, 285 pages.