

# Instrumentation d'un remblai en zone inondable. Exemple du remblai expérimental du CER

Gratien VINCESLAS<sup>1\*</sup>, Valéry FERBER<sup>2</sup>,  
Elisabeth HAZA-ROZIER<sup>1</sup>,  
Reynald FLAHAUT<sup>3</sup>,  
Cyrille FAUCHARD<sup>4</sup>

<sup>1</sup> CETE Normandie-Centre,

Centre d'expérimentation routière

Équipe de recherche associée au LCPC n° 28

<sup>2</sup> LCPC, Centre de Nantes, France

<sup>3</sup> LRPC de Rouen, France

Équipe de recherche associée au LCPC n° 28

<sup>4</sup> LRPC de Rouen, France

Équipe de recherche associée au LCPC n° 23

## RÉSUMÉ

Pour évaluer le risque induit par l'utilisation de sols sensibles à l'eau dans des remblais en zone inondable et la pertinence d'une méthodologie de prévision des déformations des corps de remblai, le Centre d'Expérimentation Routière de Rouen (CER) et le Laboratoire Central de Ponts et Chaussées (LCPC) en partenariat avec la Société Nationale des Chemins de Fer (SNCF) ont réalisé un remblai expérimental en sols fins de 5,40 m de haut sur 10 m de long et 21 m de large à sa base. Ce remblai a été fortement instrumenté, principalement pour suivre les mouvements d'eau et les déformations. La mesure de la teneur en eau a été l'occasion de mettre en œuvre des techniques nouvelles ou encore peu diffusées. Le comportement de l'ouvrage a été suivi durant la phase de construction et les deux phases d'inondation de sa base.

## Instrumentation of a flood zone embankment: Example of the CER experimental embankment

## ABSTRACT

*In order to evaluate both the risk induced by using water-sensitive soils within embankments located in flood zones and the relevance of a methodology for predicting embankment body deformation, the Rouen-based Road Experimentation Center (CER) and LCPC, in partnership with the SNCF National Railway Company, constructed an experimental embankment made of fine-grained soils 5.40 m high by 10 m long and 21 m wide at its base. This embankment was heavily instrumented, primarily for the purpose of monitoring water movements and deformations. The water content measurement provided the opportunity to implement new or still relatively unfamiliar techniques. Structural behavior was tracked first during the construction phase and then over the two flooding phases at the embankment base.*

### \* AUTEUR À CONTACTER :

Gratien VINCESLAS

gratien.vinceslas@developpement-durable.gouv.fr

## INTRODUCTION

L'objectif de ce remblai expérimental est de fournir des données utiles pour évaluer le risque induit par l'utilisation de sols sensibles à l'eau dans des remblais édifiés en zone inondable. L'étude du comportement du remblai expérimental construit sur le site du CER permettra d'évaluer la méthodologie de prévision des déformations qui a été développée au LCPC. La mise en œuvre de différentes techniques de suivi des états hydriques permettra également d'apprécier leur pertinence dans ce contexte.

L'intérêt d'un tel ouvrage est d'autoriser à terme l'utilisation maîtrisée de sols disponibles dans l'emprise d'un projet routier ou ferroviaire en lieu et place de matériaux insensibles à l'eau dit « nobles ». Les enjeux sont financiers aussi bien que liés au principe de développement durable, qui suppose de valoriser les sols disponibles pour éviter d'avoir recours au transport de granulats en provenance de carrières souvent éloignées du chantier.

Cette expérimentation a fait l'objet de deux rapports de recherche [1-2]. Cet article présente l'Instrumentation mise en œuvre dans l'ouvrage expérimental et les principaux résultats issus du suivi.

## CONTEXTE

La conception des remblais routiers et ferroviaires réalisés en sols fins se heurte dans certains contextes à un déficit de connaissances sur le comportement de ces matériaux lors de variations de leur état hydrique. C'est en particulier le cas pour les sols effondrables dont la résistance mécanique diminue en présence d'eau. Ce phénomène est dû principalement :

- à la composition du sol (proportion d'argile par exemple) ;
- aux conditions de mise en œuvre, en particulier la teneur en eau ou le degré de saturation, et la masse volumique sèche après compactage ;
- aux évolutions du milieu extérieur (position des nappes ou inondation de l'ouvrage ou encore amplitudes des cycles saisonniers séchage/imbibition).

Les recherches actuelles menées sur ces sujets visent, à terme, à proposer des méthodes de calcul destinées à évaluer les déformations des ouvrages sous différents types de sollicitations (inondation, cycles séchage-imbibition, ...) sur la base d'essais de laboratoire appropriés. Cette démarche, qui reste actuellement du domaine de la recherche, ne pourra s'appliquer à la conception et au dimensionnement des remblais qu'à la condition d'avoir été validée sur des ouvrages en grandeur réelle. C'est ce qui a motivé la réalisation de ce remblai expérimental dédié à la recherche. Pour étudier le caractère effondrable des sols compactés, la base de ce remblai a été sous-compactée.

L'instrumentation du remblai est destinée à :

- observer les conséquences des évolutions des paramètres météorologiques sur les variations du profil hydrique dans les couches superficielles ;
- analyser les conséquences d'une saturation de la base du remblai sur la hauteur des remontées capillaires dans le corps de l'ouvrage ;
- étudier les relations entre les variations d'état hydrique et les déformations locales réelles dans l'ouvrage pour les confronter aux expérimentations en laboratoire ;
- évaluer, pendant une longue période, la pertinence et la fiabilité de différents capteurs de suivi de la teneur en eau et de la succion dans un ouvrage en terre.

## LE REMBLAI EXPÉRIMENTAL

### ■ Réalisation du remblai

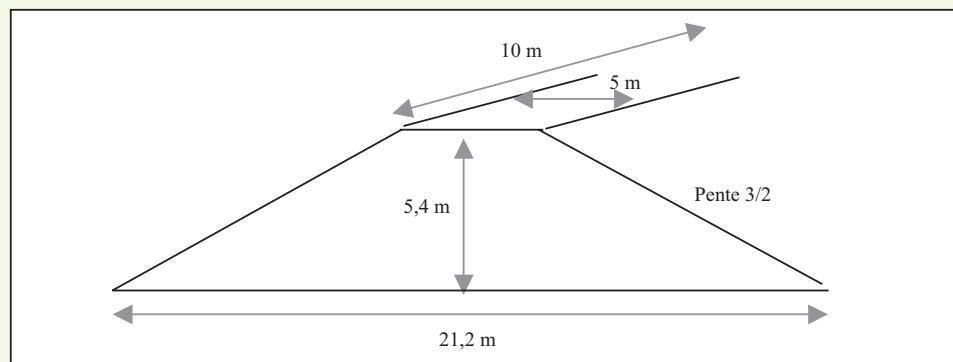
Le remblai expérimental (hors rampe d'accès et aménagements connexes) a les dimensions suivantes ([Figure 1](#)) : une longueur de 10 m ; une hauteur de 5,4 m ; une plate-forme de largeur 5 m ; une base (V) de 21,2 m ; des pentes de talus de l'ordre de 3Horizontal/2Vertical.

Les différentes couches de l'ouvrage ([Figure 2](#)) ont été déposées en trois phases.

- Première phase : préparation du sol support, mise en place du dispositif d'étanchéité de façon à isoler le remblai de venues d'eau non maîtrisées par le dessous et réalisation d'une base drainante constituée de 30 cm de grave confinée dans un géotextile.
- Deuxième phase : construction du premier tiers inférieur du remblai avec du limon provenant du chantier autoroutier de l'A28. Ce premier tiers d'une hauteur de 1,8 m a été volontairement sous-compacté pour lui permettre de se tasser lors de l'essai d'imbibition de la base du remblai. La couche 4 initialement prévue au projet a été supprimée pour pouvoir doubler la hauteur de la couche 5 et accentuer ainsi le caractère effondrable de cette partie du remblai.
- Dernière phase : construction des deux tiers supérieurs avec un limon provenant de la carrière SNEC (Société Normande d'Exploitation de Carrières). La hauteur de cette partie du remblai est de 3,6 m.

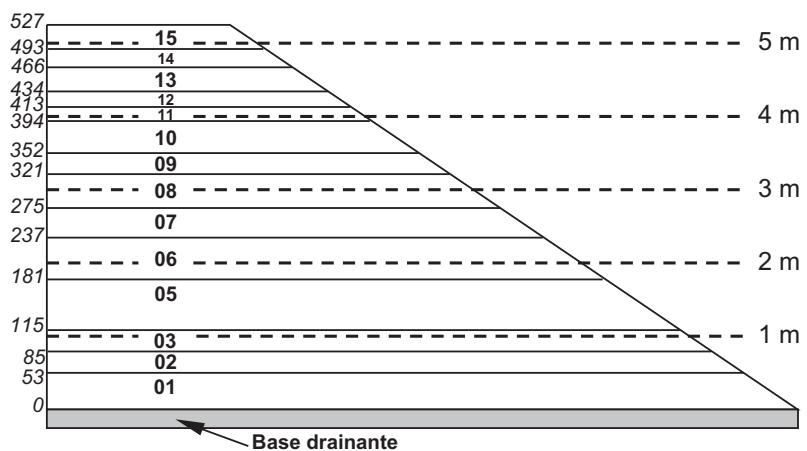
**Figure 1**

Dimensions du remblai – zone instrumentée (hors aménagements connexes)

**Figure 2**

Géométrie et numérotation des couches de sol instrumentées.

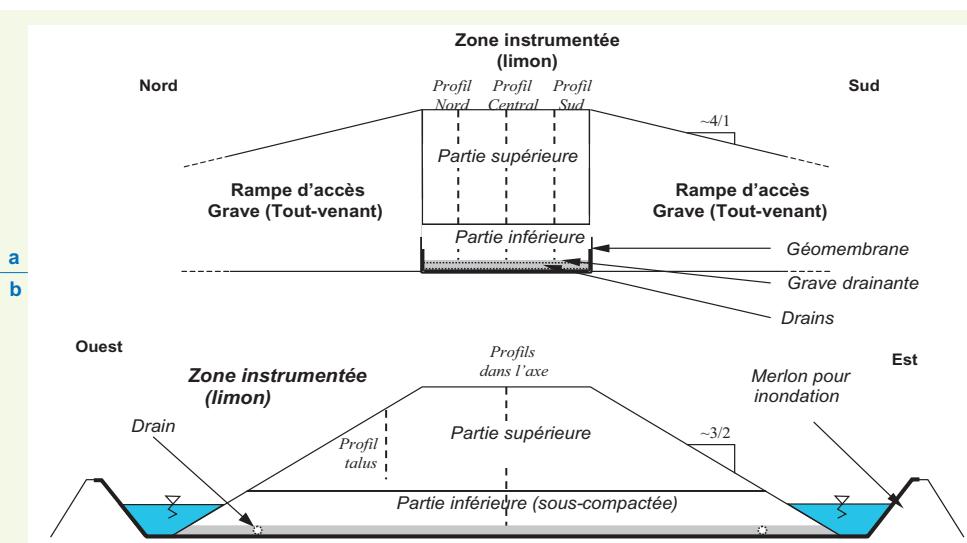
Hauteur (cm)      N° des couches instrumentées



La partie instrumentée de l'ouvrage, constituée de limon, est encadrée par les rampes d'accès, montées au fur et à mesure des couches de remblai et constituées d'une grave tout-venant disponible sur le site du CER. Entre le remblai et les rampes d'accès, le dispositif d'étanchéité est remonté sur un mètre de manière à limiter les fuites par les rampes d'accès lors des essais ultérieurs d'inondation de la base du remblai. Deux merlons, édifiés de part et d'autre du remblai et étanchés par une géomembrane raccordée à celle située sous le remblai, permettent de constituer des bassins d'inondation de deux mètres de hauteur (**Figure 3**).

**Figure 3**

Profils schématiques de la structure du remblai expérimental,  
a) profil en long,  
b) profil en travers.

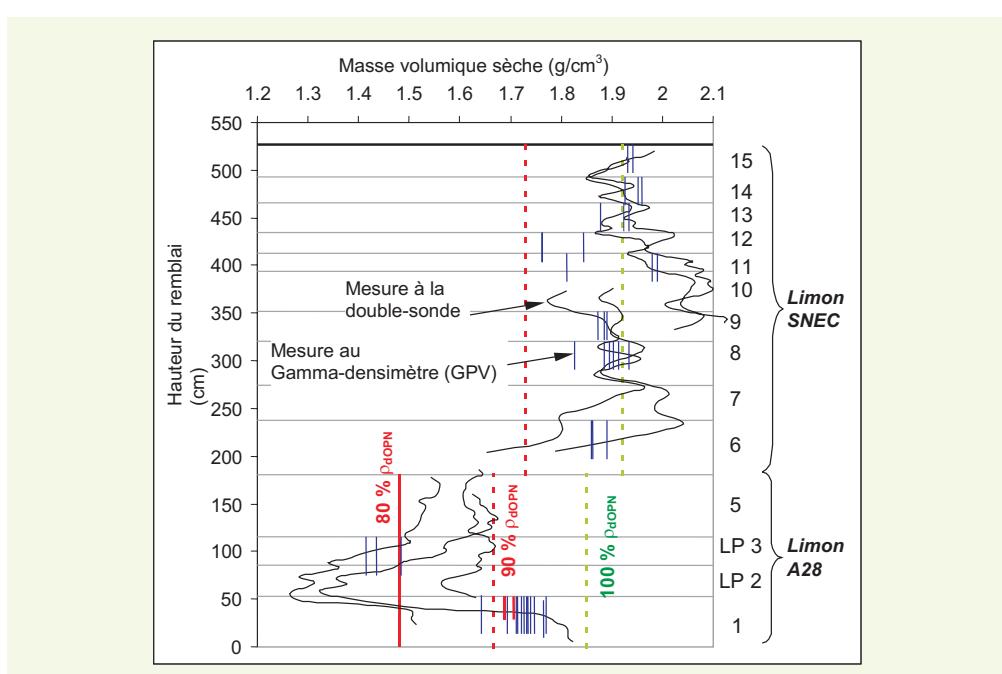


## ■ Contrôles et suivis

Les mesures de masse volumique, réalisées au Gamma Densimètre à Pointe (GPV) à chaque couche mise en œuvre et à la double-sonde gamma tous les deux mètres (**Figure 4**), montrent que la base du remblai a été effectivement sous-compactée, en particulier sur le premier mètre où les taux de compactage peuvent descendre en dessous de 80 % de l'Optimum Proctor Normal (OPN). Entre 1 et 1,8 m, les taux de compactage ne dépassent pas 90 % de l'OPN.

Dans la partie supérieure du remblai, l'application des règles de compactage du Guide Technique des Terrassements Routiers (GTR) a permis d'atteindre au moins l'objectif de densification visé (95 % de taux de compactage en moyenne, 92 % en fond de couche). Seule la couche 6 (entre 1,8 et 2,4 m), compactée sur 60 cm présente un déficit de compactage en fond de couche.

**Figure 4**  
Résultats des mesures de masse volumique sèche par GPV et double-sonde gamma.



## L'INSTRUMENTATION

Le remblai a été instrumenté avec six types de capteurs (**Figures 5 à 7**) :

- des sondes TDR (Time Domain Reflectometry) pour la mesure (indirecte) de la teneur en eau volumique (40 capteurs) ;
- des boucles hyperfréquence, permettant aussi la mesure de la teneur en eau volumique (10 capteurs) ;
- une flûte d'électrodes enterrée pour le suivi des mouvements d'eau par la méthode des panneaux électriques. Une deuxième flûte est disposée sur le remblai à chaque campagne de mesures ;
- des équitensiomètres, pour la mesure de la succion (15 capteurs) ;
- des capteurs de température de type PT100 (25 capteurs) ;
- des capteurs de déplacement vertical, aussi appelé tassomètres à flasques (18 capteurs) ;
- des capteurs de déplacement horizontal, basés sur des capteurs à câbles (8 capteurs).

L'objectif de cette instrumentation étant d'étudier les relations entre variations d'état hydrique et déformations dans le corps du remblai, les sondes TDR, de succion et les capteurs de déplacement vertical ont été placés aussi près les uns des autres que possible.

Pour compléter l'ensemble du dispositif de suivi, une station météorologique a été mise en place sur la plate-forme du remblai. Cette station est utilisée pour évaluer une méthode de modélisation des échanges hydriques sol-atmosphère développée par le Centre d'Enseignement et de Recherche en Mécanique des Sols (CERMES). Elle comporte : un anémomètre, une girouette, un capteur de rayonnement solaire, un pluviomètre, deux capteurs de température, deux capteurs d'humidité relative, un capteur de pression atmosphérique, un capteur de rosée et un capteur de température du sol.

Figure 5

Position des principaux capteurs de teneur en eau (w), succion et température dans le profil en travers principal

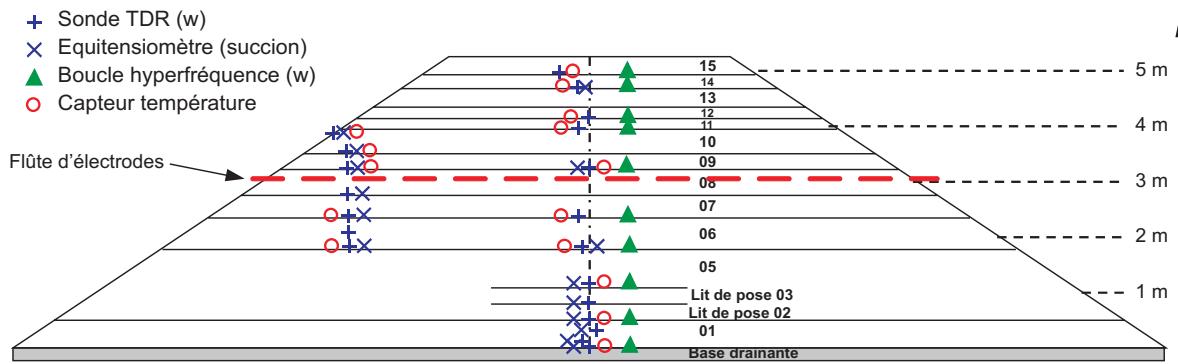


Figure 6

Position des capteurs de déplacements horizontal et vertical dans le profil en travers central

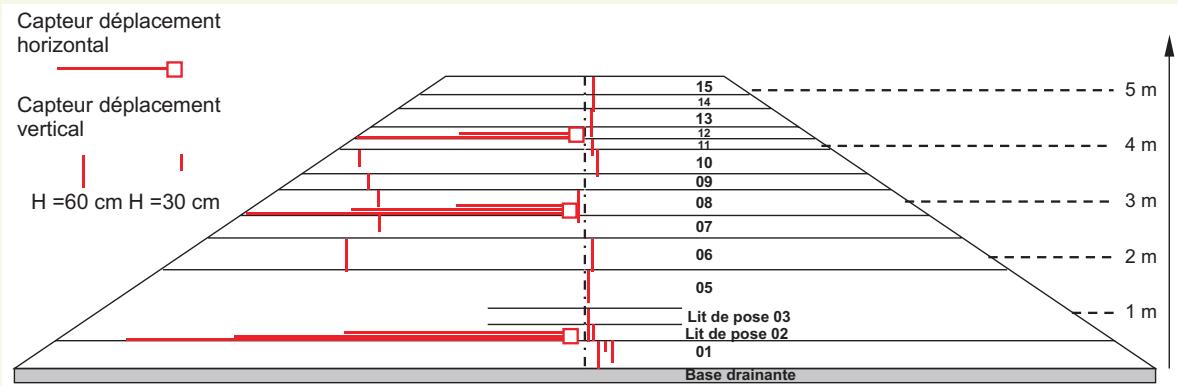
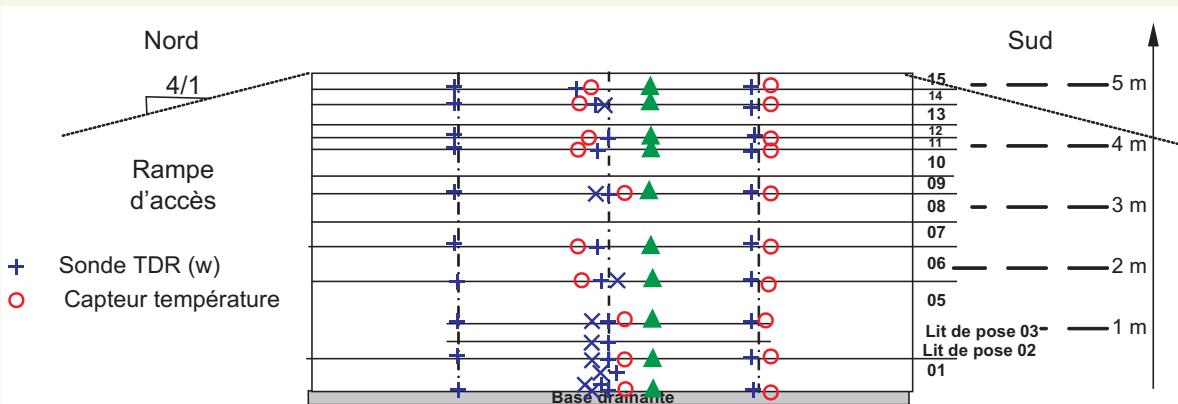


Figure 7

Position des capteurs de déplacement et de teneur en eau (w) dans le profil longitudinal



## ■ Les sondes TDR

La mesure de teneur en eau volumique par sonde TDR est fondée sur la réflectométrie dans le domaine temporel (Time Domain Reflectometry). Le principe de la technique consiste à envoyer une impulsion électromagnétique dans un guide d'onde (**Figure 8**) formé de trois électrodes métalliques de longueur connue et à en mesurer le temps de transit. La vitesse à laquelle se déplace l'impulsion dans le guide d'onde dépend de la constante diélectrique du matériau en contact. Cette vitesse est d'autant plus faible que le matériau possède une constante diélectrique élevée. Du fait de l'écart important de constante diélectrique entre la matrice solide du sol (1 à 3) et l'eau (80), la constante diélectrique apparente  $Ka$  vue par la sonde TDR dépend fortement de la teneur en eau du sol :

$$Ka = (t \times c / L)^2 \quad (1)$$

où  $t$  est le temps de transit de l'impulsion électromagnétique dans le guide d'onde,  $c$  la vitesse de la lumière et  $L$  la longueur du guide d'onde.

Cette technique étant opérationnelle, un matériel du commerce (système TRASE) a été utilisé. Ce matériel fournit la teneur en eau volumique du sol à partir de la constante diélectrique en utilisant ses propres courbes de calibration. Un étalonnage des sondes dans les deux matériaux employés pour ce remblai expérimental a permis de vérifier l'incertitude de mesure de 2 % annoncée par le fabricant de l'appareillage.

**Figure 8**  
Sonde TDR  
(Teneur en eau volumique)



## ■ Les antennes boucles

Il s'agit d'une méthode de détermination de la teneur en eau volumique des sols en place développée par l'Équipe de Recherche Associée au LCPC n° 23 du Laboratoire régional des ponts et chaussées de Rouen. Cette méthode s'appuie sur la mesure de la perte d'énergie d'une onde électromagnétique émise dans une antenne boucle enterrée.

Le matériel utilisé est composé d'une antenne boucle de 10 cm de diamètre (**figure 9**) reliée à un analyseur de spectre par un câble hyperfréquence à très faible atténuation. L'analyseur effectue un balayage de fréquences entre 100 et 800 MHz et fournit le spectre de la perte entre l'énergie émise et l'énergie retournée (**figure 10**).

L'étude des fréquences de résonance, c'est-à-dire des pics du spectre, conduit à la détermination de la constante diélectrique du sol au voisinage de l'antenne à l'aide de la formule suivante :

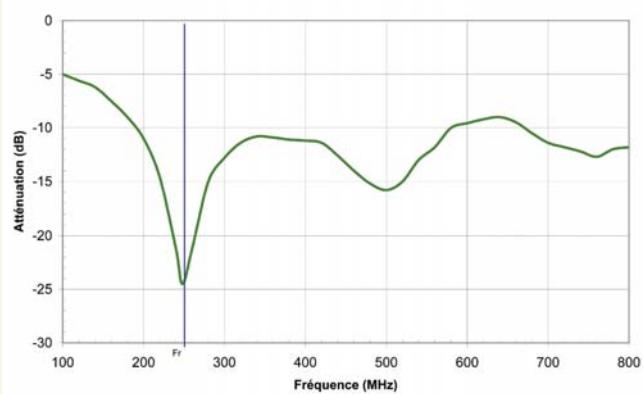
$$\sqrt{\epsilon'} = \frac{c \times k}{Fr \times \pi \cdot d} \quad (2)$$

où  $k$  est l'ordre de la résonance,  $\epsilon'$  la constante diélectrique du matériau,  $d$  le diamètre de la boucle en mètre,  $c$  la vitesse de la lumière en mètre par seconde et  $Fr$  la fréquence de résonance en Hz.

**Figure 9**  
Antenne boucle



**Figure 10**  
Exemple de spectre obtenu avec l'analyseur



De nombreuses relations données dans la littérature permettent de relier cette constante diélectrique à la teneur en eau volumique du sol. A partir de la formule de Topp [3], la teneur en eau volumique ( $\theta^{\text{Topp}} [\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}]$ ) est donnée par :

$$\theta = -5,3 \times 10^{-2} + 2,92 \times 10^{-2} \varepsilon - 5,5 \times 10^{-4} \varepsilon^2 + 4,3 \times 10^{-6} \varepsilon^3 \quad (3)$$

Le modèle de C.R.I.M (Complex Refractive Index Method) ou de Krazewski permet de déduire la formule expérimentale [4] dite de « Labo » avec laquelle on obtient la teneur en eau volumique ( $\theta^{\text{Labo}} [\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}]$ ) en fonction de la constante diélectrique et de la masse volumique humide du milieu ( $d_h$ ) :

$$\theta = 1,249 \times 10^{-1} \cdot \sqrt{\varepsilon} - 3,85 \times 10^{-2} \cdot d_h - 1,279 \times 10^{-1} \quad (4)$$

Ces relations permettent de calculer des incertitudes théoriques qui sont de l'ordre de 20 % pour le modèle de Topp et de 7 % pour le modèle de C.R.I.M. [6].

## ■ La flûte d'électrodes (Panneau électrique)

### ➤ Principe de la mesure

Les méthodes électriques sont fondées sur la mesure du paramètre de résistivité. La résistivité d'un milieu est sa capacité à s'opposer au passage d'un courant électrique. Elle s'exprime en ohm  $\times$  mètre. Son inverse, la conductivité s'exprime en siemens par mètre. Dans la pratique, on mesure la résistivité d'un sol ou d'un matériau à l'aide de quatre électrodes. Deux électrodes, A et B, servent à injecter un courant continu d'intensité  $I$  dans le milieu, tandis que deux autres électrodes, M et N, permettent de mesurer une différence de potentiel  $V$  induite par le passage

de ce courant. La résistivité apparente  $\rho'$  est la différence de potentiel mesurée divisée par ce courant et multipliée par un coefficient  $k$  tenant compte de la géométrie du dispositif. C'est un paramètre directement déduit d'une mesure et qui intègre un certain volume de terrain dont les propriétés électriques sont hétérogènes dans l'espace (la résistivité « vraie » pouvant varier d'un point à l'autre) :

$$\rho' = k \frac{V}{I} \quad (5)$$

Les mesures par panneaux électriques permettent d'automatiser les mesures le long d'une série d'électrodes (**Figure 11**). Selon un protocole défini par l'utilisateur, des mesures successives sont réalisées entre différents couples AB – MN. On obtient ainsi une coupe des résistivités apparentes. Une inversion est nécessaire pour donner un modèle en résistivité vraie [5].

#### ➤ Mise en œuvre dans le remblai expérimental

##### Le dispositif de surface

Afin de réaliser des mesures par panneaux électriques selon des configurations habituelles, on a choisi d'instrumenter le remblai au niveau de la surface. Le dispositif retenu comporte 48 électrodes espacées de 0,50 m, soit un dispositif d'une longueur développée de 23,50 m. Implanté transversalement à l'axe du remblai, ce dispositif couvre les deux talus et la plate-forme. On se trouve donc dans le cas d'un panneau électrique réalisé le long d'une topographie très marquée.

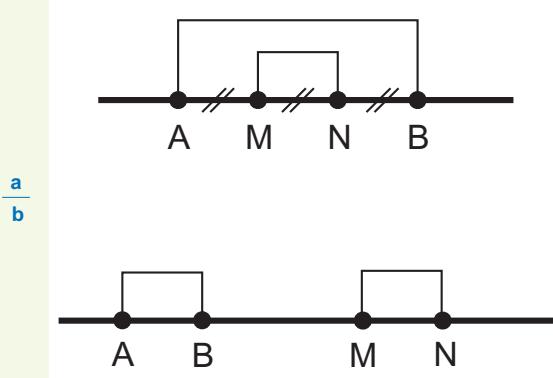
Les protocoles de mesure Wenner et Dipôle-Dipôle ont été mis en œuvre (**Figure 12**). Le protocole Wenner consiste à mesurer la tension (MN) entre les électrodes d'injection du courant (AB), la distance entre chaque électrode étant constante. Le protocole dipôle-dipôle consiste à mesurer la tension dans des dipôles (MN) en s'éloignant progressivement du dipôle d'injection du courant (AB). Cette technique permet d'intéresser une profondeur de mesure qui augmente avec la distance entre ces dipôles [8].

Pour le dispositif de surface, le nombre de mesures est de 360 pour le protocole Wenner et de 822 pour le protocole Dipôle-Dipôle.

**Figure 11**  
Flûte interne d'électrodes pour tomographie de résistivité électrique



**Figure 12**  
Protocoles de mesure  
a : Wenner  
b : dipôle-dipôle



### Dispositif enterré

Afin d'obtenir des valeurs de résistivité du cœur du remblai, il a été choisi d'enfoncer une flûte à mi-hauteur du remblai. La flûte dispose de 24 sorties espacées de 0,50 m. Le dispositif mis en place a donc une longueur de 11,50 m. Cette flûte a été placée transversalement à l'axe du remblai et horizontalement. Elle se trouve à l'aplomb du dispositif de surface. Le nombre de mesures est de 84 pour le protocole Wenner et de 256 pour le protocole Dipôle-Dipôle.

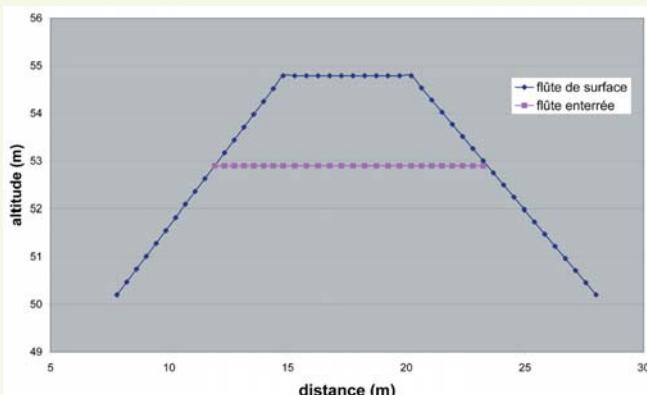
### Dispositif de tomographie

La mise en place des deux dispositifs (de surface et enterré) permet de trouver une configuration de mesure identique à celle entre deux forages (figure 13). On a donc choisi de réaliser des mesures entre les électrodes enfouies dans le remblai et une partie des électrodes de surface. Ce dispositif est constitué de 48 électrodes, les 24 de la flûte enfouie et 24 électrodes de surface (électrodes de la plate-forme et quelques électrodes du talus). Un protocole de mesure spécifique a été élaboré. L'injection du courant et la mesure de différence de potentiel sont réalisées entre une électrode de surface et une électrode enfouie.

### ➤ Réalisation des mesures

La première série de mesures a été réalisée avec un matériel IRIS de type Syscal. Les autres séries ont été réalisées avec un matériel ABEM (système multi-électrode Lund). L'ensemble des éléments pouvant être à l'origine d'une perturbation de la mesure a été pris en compte de façon à faciliter l'interprétation (mise en eau de la base du remblai, électrodes déplacées suite à la mise en eau, électrodes inaccessibles compte tenu de la mise en eau, températures, ...).

**Figure 13**  
disposition des flûtes



## ■ Les équitensiomètres

Les équitensiomètres destinés à mesurer le potentiel hydrique du sol fonctionnent sur un principe différent de celui des tensiomètres courants ([Figure 14](#)). En effet, ils ne mesurent pas directement une succion, mais la teneur en eau d'un corps poreux à l'intérieur de la sonde. Ce corps poreux est caractérisé, en particulier par sa courbe de rétention (suction en fonction de la teneur en eau). Il se met en équilibre de succion avec le sol environnant, ce qui modifie sa teneur en eau. Avec la courbe de rétention qui sert d'étalonnage, il est ainsi possible de déterminer la succion du sol en mesurant la teneur en eau du corps poreux. Les succions sont exprimées en pressions négatives.

Contrairement aux tensiomètres classiques dont la limite de mesure se situe vers 90 kPa, ces capteurs, adaptés à la mesure de succion dans les sols moyennement argileux à l'état sec, sont susceptibles de mesurer des succions allant de 0 à -1 000 kPa avec une incertitude de  $\pm 10$  kPa dans la plage de mesure 0 à -100 kPa et de  $\pm 5$  % de -100 à -1 000 kPa. Mais, de par leur principe, ils ne peuvent pas mesurer la pression interstitielle positive.

**Figure 14**  
Equitensiomètre  
(capteur de succion)



## Les capteurs de déplacement

Les capteurs de déplacement vertical et horizontal sont conditionnés pour mesurer respectivement :

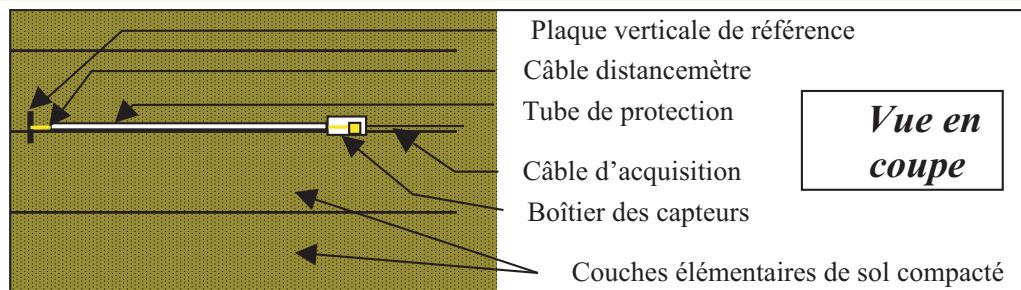
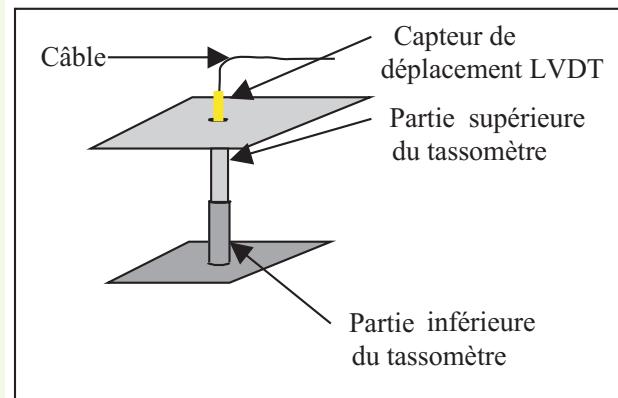
- le tassement des couches élémentaires (tassomètre) ; il s'agit alors de capteurs de type LVDT (Linear Variable Differential Transformer) ([figure 15](#)) ;
- la déformation horizontale d'une couche sur plusieurs mètres ; il s'agit alors de capteurs à câble ([figure 16](#)).

L'incertitude intrinsèque des capteurs utilisés est de 0,2 %. Le montage dans lequel ils sont incorporés et la mise en œuvre dans le corps de remblai engendrent une incertitude globale plus importante.

## ■ Pose de l'instrumentation

La pose des sondes TDR, des boucles hyperfréquence, de la flûte d'électrodes, des équitensiomètres et des capteurs de température a simplement consisté à creuser légèrement la surface de la couche compactée, à placer le capteur et à le recouvrir du matériau extrait lors de l'excavation. Pour chaque sonde de teneur en eau, un prélèvement de matériau a été réalisé pour déterminer la teneur en eau pondérale au droit de la sonde afin de caler l'origine du suivi hydrique.

**Figure 15**  
Schéma de principe du tassomètre



**Figure 16**  
Schéma de principe de la mesure de déformation horizontale

La pose des tassomètres à flasques est plus délicate car ils mesurent les variations de hauteur d'une épaisseur de sol donnée. La pose a donc été réalisée en positionnant soigneusement la flasque inférieure au fond d'une excavation parallélépipédique dont la profondeur a été mesurée (**Figure 17a**). La flasque posée, l'excavation est rebouchée en reconstituant au mieux l'état initial (masse volumique de la couche concernée, **Figure 17b**). Un contre-tube sert à ménager une réservation pour la mise en place du tube coulissant solidaire de la flasque supérieure. Les dimensions de la plaque supérieure permettent de couvrir une surface plus importante que celle de l'excavation de sorte que la mesure de tassement prend en compte un volume important de sol non remanié. Une fois la flasque supérieure positionnée (**Figure 17c**), le capteur de déplacement est installé dans le dispositif (**Figure 17d**). Il est ensuite réglé et fixé définitivement. Ensuite, la première lecture du capteur associée à la hauteur entre les deux flasques est effectuée.

Les capteurs de déplacement horizontal mesurent, par l'intermédiaire de câbles tendus, la distance qui les sépare de plaques rigides fixées verticalement dans le sol. Deux ou trois capteurs sont conditionnés dans une boîte hermétique (**figure 18a**) d'où sortent les câbles de longueurs différentes protégés par des tubes PVC. Une fois l'ensemble posé sur le sol compacté, la longueur du dispositif est mesurée et associée à la première mesure. Une couche de matériau est posée manuellement et un coffre de protection en acier est placé sur la boîte de conditionnement des capteurs (**figure 18b**). La couche sur-jacente est ensuite mise en œuvre.

## PHASES DE SUIVI DE L'INSTRUMENTATION

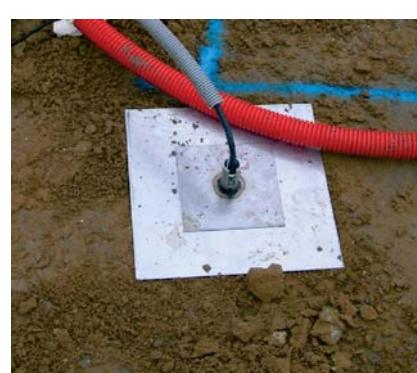
La première phase de suivi a porté sur la période « fin de la construction (fin de l'année 2004) jusqu'aux préparatifs de la première inondation (début de l'année 2006) » pour observer le comportement du remblai sous conditions météorologiques. Les deux autres phases de suivi ont été les inondations en pied de début 2006 et fin 2006.

**Figure 17**

*Mise en place d'un tassomètre à flasques*

- Excavation pour pose de la flasque inférieure*
- Rebouchage de l'excavation*
- Pose de la flasque supérieure*
- Après pose du capteur LVDT*

a  
b  
c  
d



**Figure 18**

*Capteur à câbles de déplacement horizontal*

- boîtier de conditionnement*
- vue après pose*



a | b

La première inondation de début 2006 s'est déroulée en trois étapes :

- saturation de la base drainante. L'objectif de cette étape était d'observer uniquement les conséquences d'une montée de la nappe sur les remontées capillaires dans la base du remblai ;
- remplissage des bassins des deux côtés du remblai avec une charge hydraulique de l'ordre de 1 m. Cette phase était destinée à générer une saturation complète de la base effondrable du remblai pour observer les conséquences de la saturation en termes de tassements ;
- vidange des bassins et observation des variations de teneur en eau dans la base du remblai.

La deuxième inondation (fin 2006) a été réalisée d'un seul côté du remblai. Pour cela, les merlons étanchés à l'aide de géomembranes qui avaient servi à réaliser les bassins lors de la première inondation, ont été démontés pour mettre en œuvre un dispositif unilatéral de retenue d'eau permettant d'assurer le maintien d'un niveau d'inondation supérieur à 1,5 m pendant 4 semaines. L'objectif de cette seconde sollicitation était d'observer les conséquences d'une inondation asymétrique sur le remblai et son état hydrique.

## PRINCIPAUX RÉSULTATS DE MESURE

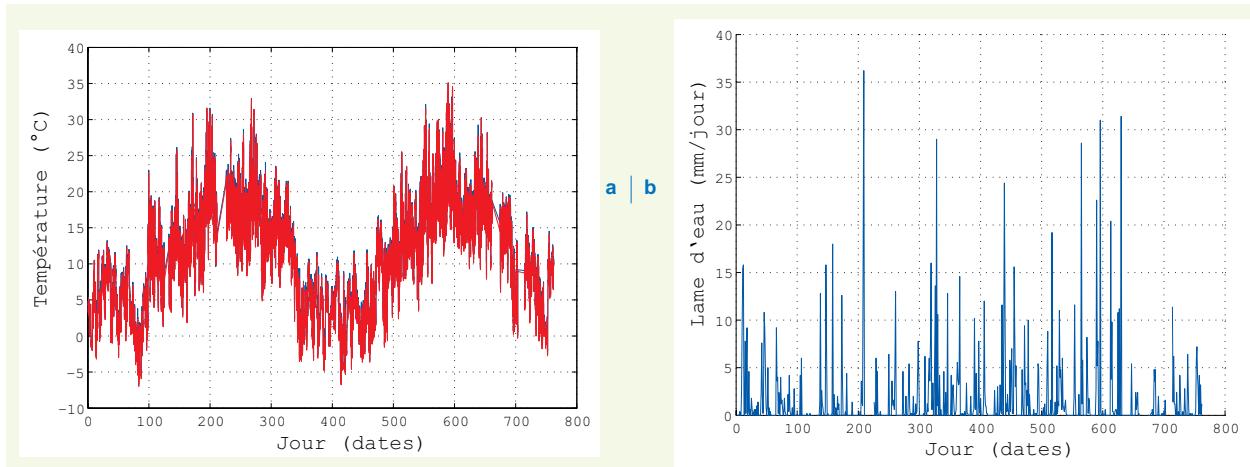
L'origine des phases d'observation (0 jour) correspond à la fin de la construction du remblai.

**Figure 19**

Relevés météorologiques bruts entre début décembre 2004 et fin décembre 2006  
a) température de l'air  
b) pluviométrie

### Conditions météorologiques

L'évolution des températures et des précipitations relevées par la station météo positionnée sur la plate-forme du remblai est présentée sur les [Figure 19a](#) et [Figure 19b](#).



### Sondes de température

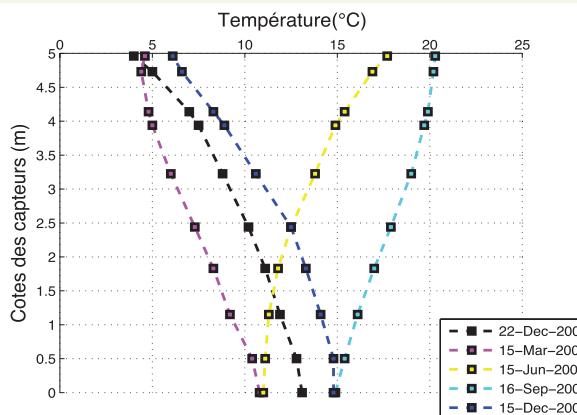
Les sondes de température ont été installées sur trois profils verticaux (axe sud, axe central et talus ouest). Elles sont destinées à fournir des informations :

- sur les transferts de chaleur dans le sol, utilisés par la modélisation des échanges sol-atmosphère ;
- sur la température dans le sol afin de corriger les mesures de résistivité électrique.

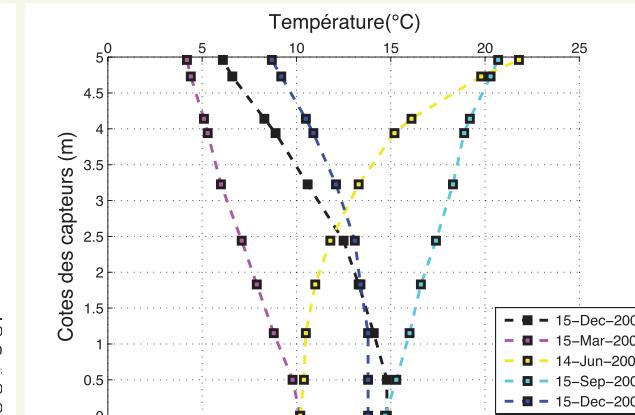
La [figure 20](#) illustre le suivi des températures sur deux années dans l'axe central. Les températures montrent une variabilité beaucoup plus forte à proximité de la surface (de 4 à 25 °C) que dans la base du remblai (de 10 à 15 °C). Ces mesures permettent une correction fine des mesures de résistivité électrique.

### Sondes TDR (teneur en eau volumique)

Les sondes TDR sont des capteurs capables de mesurer la teneur en eau volumique des sols dans lesquels elles sont installées. Étant donné que la teneur en eau volumique est le produit de la teneur en eau pondérale par la masse volumique sèche, ce paramètre est sensible aux variations de masse volumique. Dans cette expérimentation, les plages de variation de la masse volumique sèche observées sont faibles. Les mesures fournies par les sondes TDR reflètent principalement les variations de teneur en eau pondérale.



**Figure 20**  
Évolution du profil de température dans l'axe central  
a) année 2005  
b) année 2006



a | b

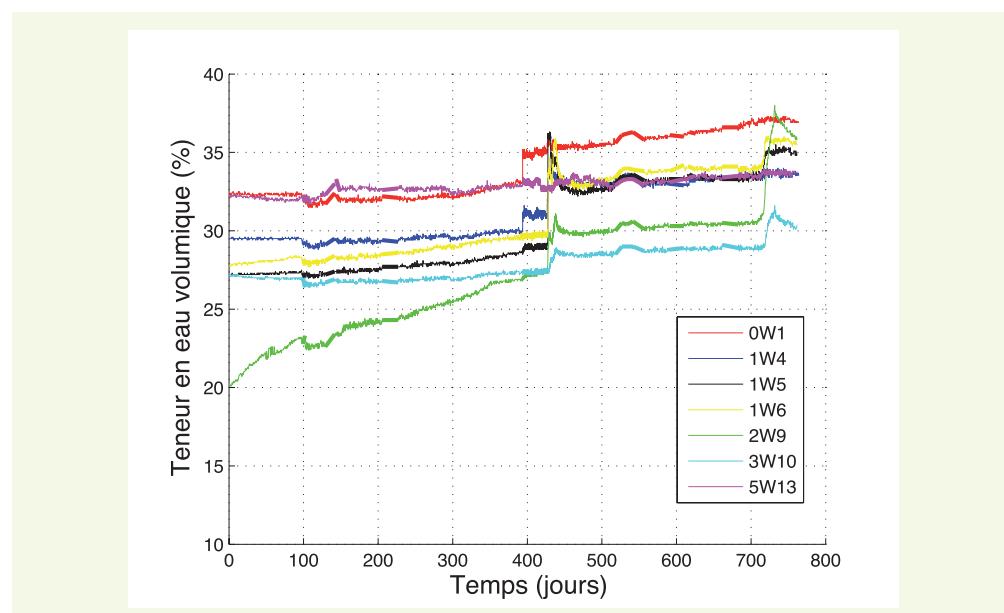
Dans la partie inférieure du remblai c'est-à-dire dans la base effondrable, la plupart des sondes ne montrent pas de grandes variations de la teneur en eau volumique au cours des 300 premiers jours, à l'exception de la sonde située dans la couche la moins compactée (sonde 2W9, **figure 21**) qui subit un tassement. Les tassomètres placés dans cette zone permettent d'attribuer deux points de teneur en eau à cette évolution, le reste étant dû à une infiltration d'eau par les talus.

Les mouvements d'eau engendrés par les inondations à 430 et 720 jours sont clairement enregistrés par les sondes TDR. L'allure des courbes montre une saturation en eau du sol dans la partie inférieure du remblai située entre 0 et 30 cm de hauteur (sondes 0W1 et 1W4). La saturation est confirmée par le manque de réaction de ces sondes lors de la deuxième inondation.

### ■ Antennes boucles

La **figure 22** présente un exemple de résultats de calculs volumiques de la teneur en eau à l'aide des formules présentées précédemment, comparés aux mesures réalisées par les sondes TDR. Les résultats obtenus notamment par la méthode « Labo » sont proches des résultats issus des TDR, la méthode TDR étant la référence pour cette expérimentation. Les écarts relevés entre les méthodes

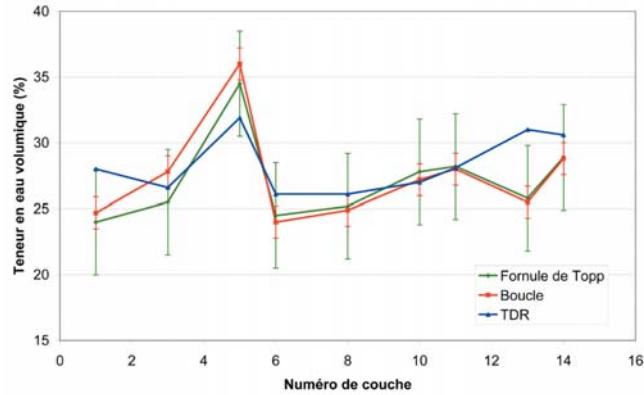
**Figure 21**  
Évolution en fonction du temps de la teneur en eau volumique mesurée par les sondes TDR dans la base effondrable du remblai.



peuvent s'expliquer par le fait que les sondes ne mesurent pas le même échantillon de sol bien que placées très près. En effet, les hétérogénéités relatives du sol en teneur en eau et en masse volumique influent sur les résultats.

**Figure 22**

Exemple de comparaison des teneurs en eau mesurées et calculées



### ■ La flûte d'électrodes (Panneau électrique)

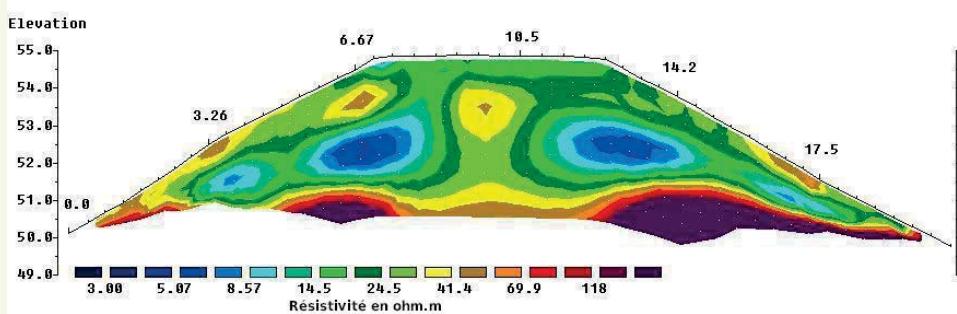
L'objectif de cette instrumentation est d'apprécier la capacité des mesures de résistivité de type panneau électrique à évaluer les variations de l'état hydrique des matériaux au sein d'un ouvrage en terre. À l'heure actuelle, les panneaux électriques réalisés à partir de la surface ont fait l'objet d'une inversion à l'aide du logiciel Res2DInv, en incluant la topographie ([figure 23](#)). On constate sur ces panneaux des variations de résistivité d'une série de mesures à l'autre.

L'interprétation de ces variations est plus complexe. En effet, la résistivité varie en fonction de la température et des corrections sont donc nécessaires en prenant en compte les valeurs de température au sein du remblai au moment de la réalisation de chaque série de mesures. Ce travail reste à réaliser.

De même, les mesures effectuées à partir de la flûte enfouie ou celles réalisées en tomographie ne peuvent être exploitées à l'aide des logiciels actuellement disponibles. Un module de calcul par éléments finis du logiciel CESAR-LCPC devrait permettre prochainement d'inverser ces mesures et de juger des performances de cette méthode pour le suivi des variations hydriques d'un sol.

**Figure 23**

Exemple de résultat Variation de la résistivité dans le remblai



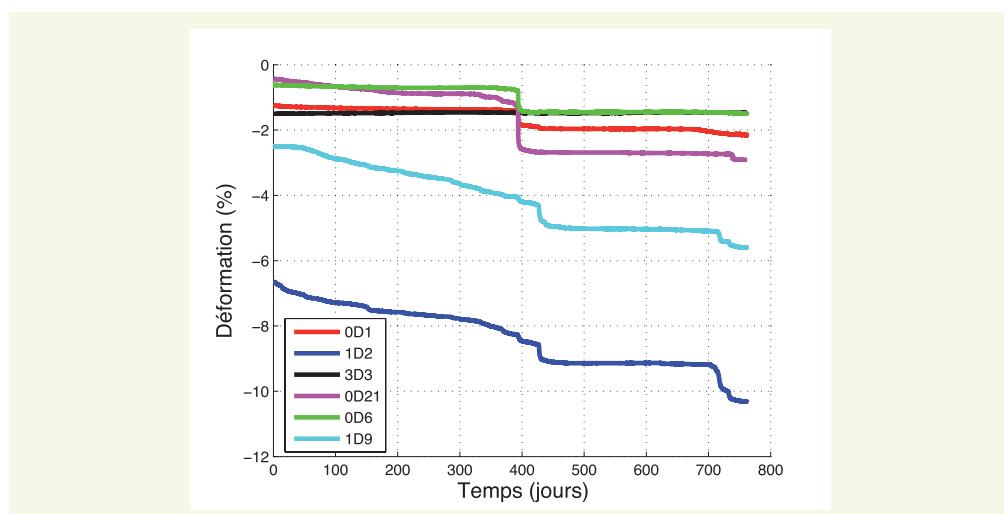
### ■ Capteurs de déplacement vertical

La [figure 24](#) présente les déplacements verticaux dans la base du remblai convertis en déformations. On peut constater que les déformations dans la base du remblai sont uniquement des tassements, et que l'amplitude de ces déformations atteint des valeurs élevées (jusqu'à 8 %) dans la zone

la plus faiblement compactée (capteurs 1D2 et 1D9) avant même l'inondation. Il a pu être montré en analysant les résultats des sondes TDR que ces tassements avant inondation résultait notamment d'une augmentation de la teneur en eau de la base effondrable.

Les deux phases d'inondation se sont traduites par des tassements supplémentaires qui ont conduit, pour la zone la plus faiblement compactée (capteurs 1D2 et 1D9), à un tassement total pouvant dépasser 10 %, dont seulement deux points de déformation sont dus à l'inondation. Ceci signifie que la base effondrable avait acquis 80 % du tassement total avant l'inondation. On peut noter, de plus, que la deuxième inondation (720 jours) a généré un nouveau tassement, supérieur à celui causé par la première inondation (430 jours) mesuré par le capteur 1D2 et qu'il y a eu une quasi-stabilité entre les deux inondations.

**Figure 24**  
Évolution en fonction du temps du déplacement vertical dans la base effondrable du remblai



## CONCLUSION

L'instrumentation du remblai expérimental s'est déroulée dans de bonnes conditions et a conduit à des résultats intéressants. La pose des capteurs a été réalisée en respectant scrupuleusement les procédures préétablies d'installation et de contrôle en place. Ceci a permis de constater très peu de dysfonctionnements de capteurs. L'essentiel des pertes a été observé, en fin de construction du remblai, à la reprise des talus à la pelle mécanique : la pente de 3H/2V étant obtenue par la méthode excédentaire. Sept capteurs ont été perdus sur un total de cent neuf posés (hors flûte d'électrodes).

Des problèmes ont été observés pour les mesures issues des équitempiomètres et d'une partie des tassomètres. Du fait d'un changement de sol (limon A28) intervenu après la commande des équitempiomètres, ceux-ci ont fonctionné dans un domaine de succion de l'ordre de 5 % de leur gamme et les mesures sont donc restées dans la plage d'incertitude de ces capteurs. Pour certains tassomètres, les déplacements mesurés sont beaucoup plus faibles que ceux obtenus par calcul, ce que l'on peut attribuer à la mise en place des capteurs qui a probablement occasionné une surdensification du sol situé entre les deux flasques.

La méthode de mesure de la teneur en eau volumique par antennes boucles donne des résultats comparables à la méthode TDR. Cette méthode a aussi pour objectif à terme, en analysant la réponse de l'antenne enterrée en fonction des fréquences injectées, d'appréhender d'autres paramètres du sol comme le rapport entre l'eau liée et l'eau libre, la masse volumique et la conductivité du milieu.

À la suite de cette expérimentation, seule l'exploitation qualitative de la méthode des panneaux électriques a été réalisée. Les nouveaux moyens de traitement en cours de développement permettront d'évaluer les mouvements d'eau, notamment dans les parties du remblai non instrumentées.

Les résultats expérimentaux bien que partiellement exploités permettent d'ores et déjà de valider la méthode de prévision des déformations d'ouvrages en sol fin et de constater qu'un sol fin peu plastique, compacté selon les règles applicables aux corps de remblais courants, peut subir, dans un remblai de hauteur modeste, une inondation sans présenter de tassements majeurs préjudiciables à la géométrie de la plate-forme.

#### RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- 1 **SAGNARD N., VINCESLAS G., FERBER V., DAVID J.-P., BODENES D., AURIOL J.-C.** « *Réalisation d'un remblai expérimental : Réalisation de l'ouvrage – Suivi du comportement du remblai sous conditions naturelles* », rapport de recherche interne, CETE Normandie Centre CER, **novembre 2005**.
- 2 **FERBER V., VINCESLAS G., SAGNARD N., DAVID J.-P., BODENES D., AURIOL J.-C., KHAY M.** « *Remblais en zones humides et inondables – Conséquences de l'inondation du remblai expérimental de Rouen et enseignements tirés pour la conception* », rapport de recherche interne, LCPC – CETE Normandie Centre, CER, **février 2007**.
- 3 **TOPP R.C., DAVIS J.L., ANNAN A.P.** « *Electromagnetic determination of soil water content Measurements in coaxial transmission lines* ». Water Resour. Res. 16, pp.574-582, **1980**.
- 4 **FAUCHARD C.** « *Teneurs en eau volumique et massique ; Mesures au radar impulsionnel ; Mesures par séchage en étuve ; Mesures à l'analyseur fréquentiel et au dipôle quart d'onde* », rapport de recherche interne, CETE Normandie Centre, LRPC Rouen, **2005**.
- 5 **BECK Y.-L.** « *Influence de la nature et de l'état des sols compactés sur leur résistivité* », rapport de stage DESS, Institut de Physique du Globe de Paris, **2004**.
- 6 **GUILBERT V., GENDRON A.** « *Suivi de la teneur en eau d'un remblai expérimental par ondes électromagnétiques* », rapport de recherche interne, CETE Normandie Centre, LRPC Rouen, **2005**.
- 7 **CHAPELLIER D.** « *Prospécion électrique de surface* », Cours de l'Université de Lausanne Institut de géophysique, **2000**.

