

OUVRAGES D'ACCÈS AU SECOND PONT SUR LE WOURI : FIABILISATION DU PROJET GRACE A UN REMLAI D'ESSAI

ACCESS ROADS TO THE SECOND BRIDGE OVER THE WOURI RIVER: RELIABILITY IMPROVEMENT DUE TO A TEST EMBANKMENT

Arnaud JUIGNET¹, Céline LEFEVRE¹, Olivier HELAS²

¹ GEOS Ingénieurs Conseils, Rueil-Malmaison, France

² DODIN CAMPENON BERNARD, Chevilly-Larue, France

RÉSUMÉ – Dans le cadre de la construction du second pont sur le Wouri, au Cameroun, les ouvrages d'accès s'insèrent dans un contexte géotechnique délicat, caractéristique des estuaires, avec d'importantes épaisseurs d'alluvions compressibles, mais aussi des remblais mis en œuvre pour gagner des terrains sur le fleuve. Le groupement de conception-construction a donc décidé de réaliser un remblai d'essai afin de fiabiliser les modèles géotechniques et donc les travaux.

ABSTRACT – As part of the construction of the second bridge over the Wouri River (Cameroon), the access roads take place in a sensitive geotechnical context which is typical of estuary with significant thickness of compressible alluvium but also backfills. The design-build consortium decided to perform a test embankment to reliable geotechnical models.

1. Introduction

Le second pont sur le fleuve Wouri est un projet en conception-réalisation, confié par le maître d'ouvrage (Etat du Cameroun) au groupement emmené par SOGEA-SATOM. Il comprend la réalisation d'un pont de 760 m de longueur supportant un tablier routier et un tablier ferroviaire ainsi que les accès associés. L'ouvrage, parallèle au pont existant, permet de relier la rive ouest (Bonabéri) à la rive est (Deïdo) de la ville de Douala. Les études géotechniques des accès (ouvrages en terre, ouvrages d'art courants et blocs techniques du viaduc) ont été réalisées par GEOS Ingénieurs Conseils pour le compte du groupement.

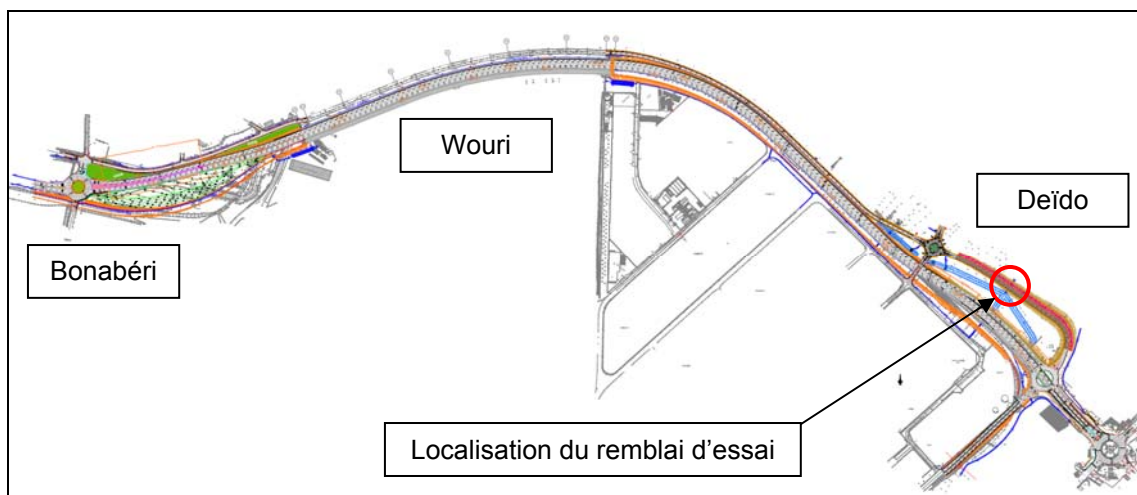


Figure 1. Vue en plan globale du projet.

L'accès côté ouest, d'un linéaire d'environ 700 m, est en profil rasant ou en déblai sur environ 580 m, puis en remblai jusqu'à l'arrivée sur le pont. L'accès côté est, d'un linéaire total d'environ 2000 m, est principalement en remblai avec des hauteurs d'ouvrages en terre qui atteignent environ 8 à 9 m au niveau du raccordement au pont et au niveau du giratoire. Les travaux des accès comprennent la réalisation de trois ouvrages d'art courants : deux cadres fermés et un double cadre avec des trémies (giratoire dénivelé).

La zone de construction se situe au niveau de l'estuaire du fleuve Wouri. Sur la rive est, les terrains ont été gagnés sur le fleuve. Le substratum est constitué par des argilites et siltites du Mio-Pliocène. Au-dessus, on trouve des remblais et des alluvions : remblais sableux, sables plus ou moins silteux, contenant des poches de terrains argileux (argiles molles) et/ou organiques (vases) et alternant avec des horizons de sols plus fins (argiles plus ou moins silteuses).



Figure 2. Vue aérienne du site (Google Maps).

2. Réalisation du remblai d'essai

2.1. Objectifs

Compte tenu de la nature compressible des sols de la zone et de la faiblesse des données de sondages et d'essais géotechniques, un remblai d'essai a été réalisé au niveau de la bretelle d'accès nord du nouveau giratoire côté Deïdo, qui est la zone la plus critique d'un point de vue géotechnique. En effet, celle-ci se situe au droit d'un bras mort du Wouri. En phase préliminaire, des tassements pouvant dépasser 2 m d'amplitude ont été estimés pour l'ouvrage en terre de la bretelle.

L'objectif du remblai d'essai était d'obtenir des informations sur la compressibilité des sols ainsi que sur leur vitesse de consolidation, qui n'avaient jusqu'alors été que peu caractérisées. Il devait également permettre d'appréhender les caractéristiques de fluage des sols, qui n'avaient pas été mesurées par des essais.

Ainsi, cette expérience en vraie grandeur avait pour but d'observer le comportement des sols à grande échelle, et plus seulement à celle de l'échantillon ou du sondage vertical, peu représentative dans ce contexte géologique lenticulaire.

2.2. Géométrie et instrumentation

Le remblai d'essai a été mis en œuvre sur un linéaire de 60 m pour une hauteur de 8 m dont 4 m de surcharge par rapport à la cote finale du projet. La contrainte appliquée au sol par le remblai était de l'ordre de 142 kPa. Les figures ci-dessous présentent la géométrie du remblai d'essai :



Figure 4. Vue en plan du remblai d'essai.

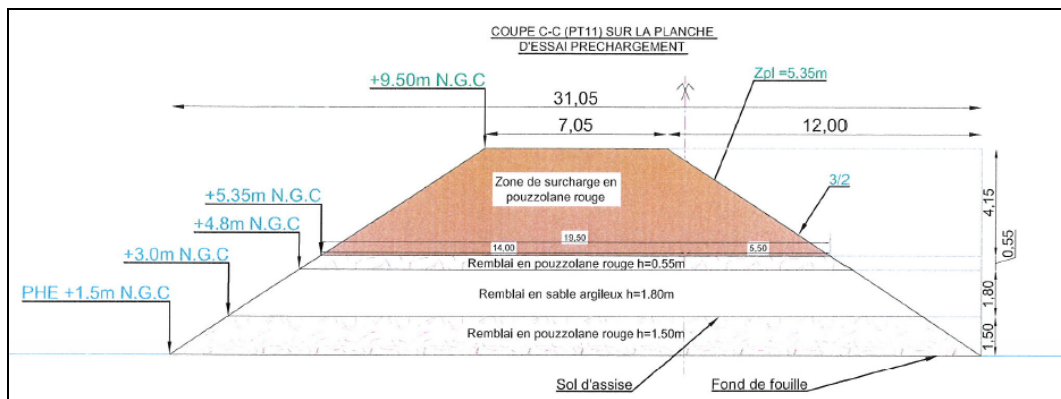


Figure 5. Vue en coupe du remblai d'essai.

Le remblai a été instrumenté par (cf. figure 4) :

- Trois profilomètres P1, P2 et P3,
- Trois tassomètres à plaque T1, T2 et T3, installés à proximité de chaque profilomètre,
- Un piézomètre installé en pied de talus.

Cette instrumentation a été complétée par un suivi topographique de la surface du remblai, une fois celui-ci monté.

3. Exploitation du remblai d'essai

3.1. Modèle géotechnique

Dans la zone du remblai d'essai, nous disposons de résultats d'essais de pénétration statique (4), de sondages destructifs (2) et d'un sondage carotté. Compte tenu de l'hétérogénéité des sols, le modèle géotechnique que nous avons retenu pour exploiter les données d'essai est basé sur une stratigraphie simplifiée :

Tableau 1. Modèle géotechnique retenu pour l'analyse du remblai d'essai

Formation	Epaisseur (m)	q_c (MPa)	E_y (MPa)
Sols fins compressibles	21,5 m	0,3	1
Sable +/- silteux lâche	10,0 m	2,0	3
Sable compact	2,0 m	-	-
Substratum	-	-	-

Nous avons considéré que les horizons au-delà des sables lâches n'avaient pas d'impact sur les déformations du remblai.

Les sols fins compressibles sont entrecoupés de lentilles et d'horizons de faible épaisseur plus sableux. Cette couche est composée de sols très mélangés (argile, vase, sable fin).

3.2. Résultats du suivi

La réalisation du remblai d'essai a débuté le 10/03/2015 et s'est terminée le 27/05/2015, soit une montée pendant 2,5 mois. Nous avons disposé de données pratiquement quotidiennes de suivi (relevés des profilomètres et des tassomètres) jusqu'au 06/07/2015. La fréquence des mesures est alors devenue hebdomadaire jusqu'au 07/12/2015.

Le relevé du piézomètre a montré un niveau d'eau quasi-constant, proche du TN.

Les profilomètres se sont révélés peu fiables sur la durée, avec des problèmes de matériel qui ont amené à cesser temporairement les mesures, notamment quand l'amplitude des tassements est devenue très importante. Ce sont les tassomètres qui ont permis d'obtenir les résultats les plus fiables. Nous avons par conséquent mené les analyses à partir de ceux-ci.

On observe sur la figure 6 en page suivante une amplitude des tassements au 07/12/2015 qui varie entre 0,83 m (tassomètre T1) et 1,78 m (tassomètre T2). Une grande partie de ces tassements (65 à 85 %) s'est produite de manière quasi-linéaire pendant la montée du remblai (excepté pour T1). On note ensuite une diminution relativement brutale de la vitesse de tassement une fois le remblai monté, avec une allure de courbe typique des phénomènes de consolidation primaire. Sur la figure 7, on observe une stabilisation de la vitesse des tassements sous charge constante (caractéristique du fluage) à partir de mi-juillet / début août, soit 1,5 mois environ après la fin des terrassements.

Pour le tassomètre T1, les tassements mesurés sont plus faibles. En effet, au niveau de T1, une partie du remblai d'essai empiétait sur une plateforme existante qui pourrait avoir joué le rôle d'un préchargement. Cela expliquerait également les faibles tassements mesurés jusqu'au 01/04 : la charge appliquée par le remblai d'essai n'avait pas encore dépassé la charge correspondant à celle de la plateforme existante.

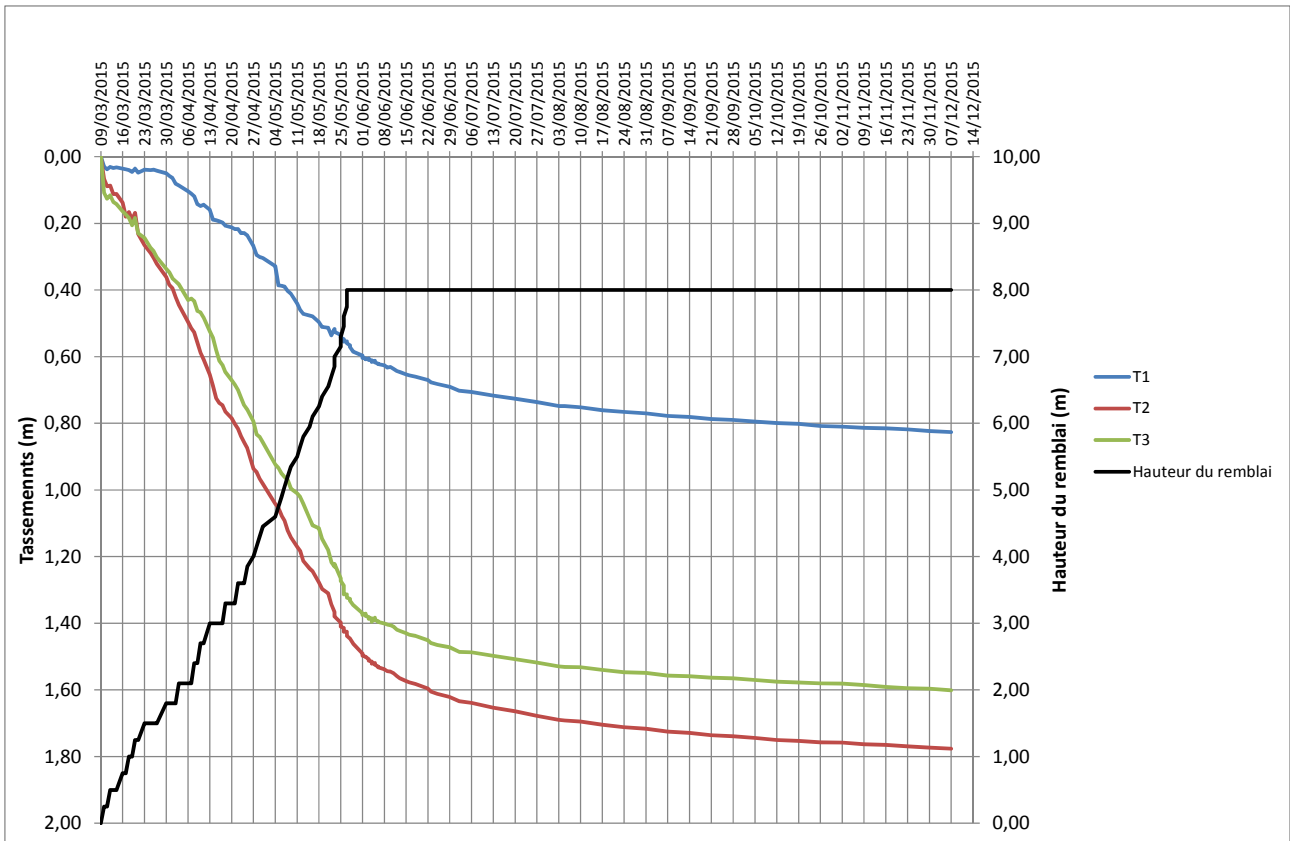


Figure 6. Suivi des tassomètres en parallèle de la montée du remblai.

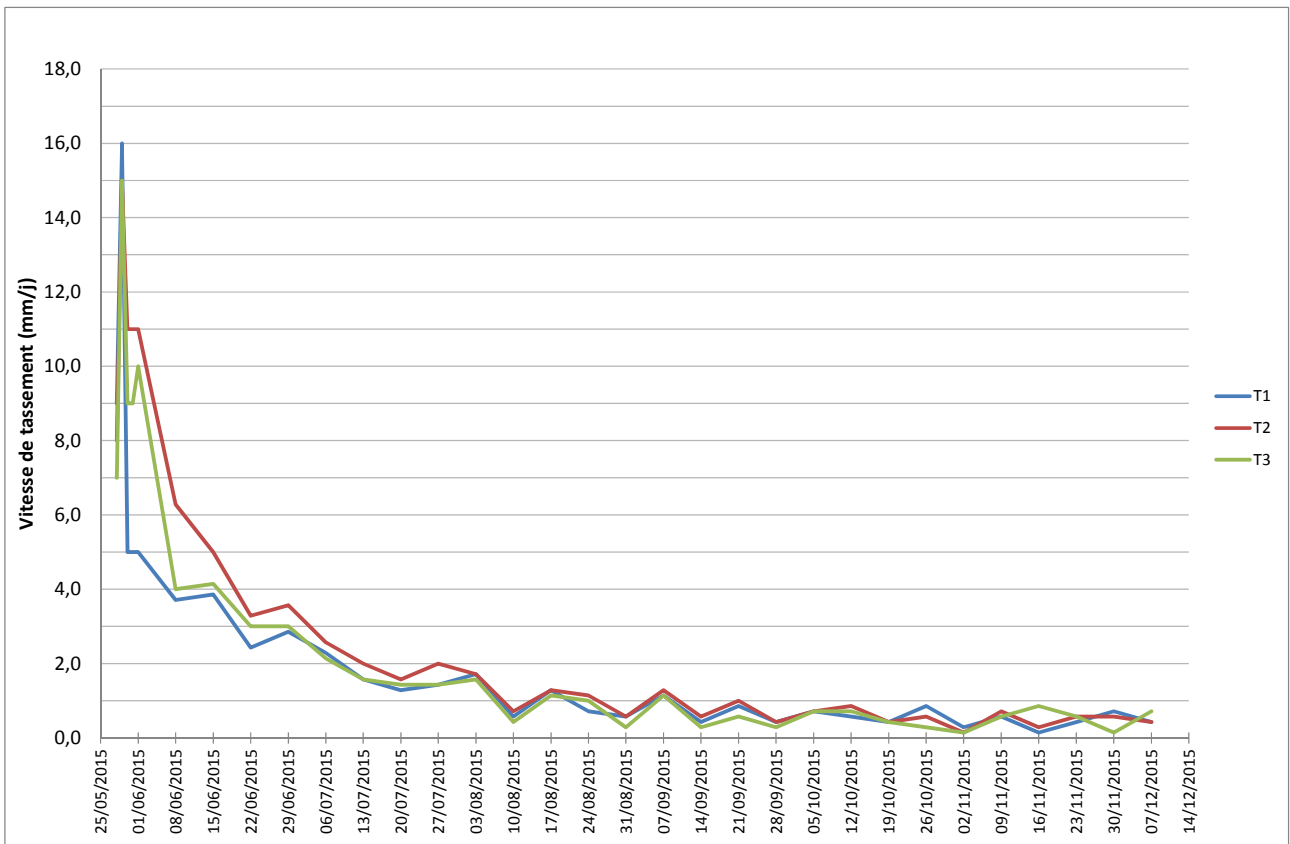


Figure 7. Evolution de la vitesse des tassements à partir de la fin de la montée du remblai.

3.3. Analyse des données

Pour analyser les données, nous avons utilisé le logiciel GEODEPL développé par GEOS Ingénieurs Conseils. Il permet d'estimer, en fonction des mesures de tassement réalisées sur le terrain, le taux de consolidation du sol et de prédire l'évolution des tassements primaires et secondaires. Trois méthodes différentes sont appliquées :

- La méthode d'Asaoka, traçant le déplacement à un instant donné en fonction du déplacement à l'instant précédent,
- La méthode de Recordon, qui recherche une loi exponentielle du tassement primaire en fonction du temps, à laquelle peut s'ajouter une loi logarithmique régissant le tassement secondaire à compter d'une certaine date,
- La méthode d'Al-Shamrani qui intègre une loi hyperbolique du tassement en fonction du temps.

3.3.1. Compressibilité des sols

Nous avons retenu pour cette analyse les mesures obtenues après la fin de la montée du remblai (charge constante) et jusqu'au 29/06/2015 (avant l'observation de la diminution de la vitesse de tassement). Les résultats obtenus sont les suivants :

Tableau 2. Estimation des tassements totaux sur la base des mesures réelles.

Tassomètre	Tassement final selon Asaoka (m)	Tassement final selon Recordon (m)	Tassement final selon Al-Shamrani (m)
T1	0,70 m	0,72 m	0,69 m
T2	1,62 m	1,66 m	1,62 m
T3	1,47 m	1,50 m	1,47 m

Les tassements estimés correspondent aux tassements de consolidation primaire. Les trois méthodes donnent des résultats relativement similaires (2 à 5 % d'écart).

GEODEPL estime également la date de fin de consolidation primaire d'après la méthode de Recordon, pour laquelle nous indiquons les tassements réellement mesurés sur site :

Tableau 3. Estimation de la date de fin de la consolidation primaire.

Tassomètre	Fin de consolidation	Tassement mesuré
T1	31/07/2015	0,74 m
T2	14/07/2015	1,65 m
T3	13/07/2015	1,50 m

Les tassements mesurés correspondent aux tassements théoriques estimés plus haut, ce qui tend à confirmer l'estimation de la fin de consolidation entre le 13/07 et le 31/07/2015, soit entre 47 et 65 jours après la fin de la montée du remblai.

Sur la base du modèle géotechnique défini précédemment, nous avons calculé les tassements théoriques sous la charge du remblai d'essai. Les calculs sont de type élastique car il s'agit de vérifier la validité du modèle géotechnique simplifié (modules équivalents de déformation des couches de sol) qui n'utilise pas la théorie de la consolidation.

Les résultats obtenus sont les suivants :

Tableau 4. Estimation théorique des tassements.

Tassomètre	T1	T2	T3
Tassements (m)	1,17 m	1,81 m	1,65 m

On note que le calcul théorique donne des résultats du même ordre de grandeur que les tassements mesurés sur site pour T2 et T3 (amplitude maximale comprise entre 1 et 2 m), ce qui fiabilise le modèle géotechnique précédemment retenu.

La proportion entre les tassements ayant eu lieu pendant la montée du remblai et les tassements différés est de l'ordre de 76 à 88 %. Le calcul théorique donne une répartition entre les tassements de la couche de sols fins compressibles (tassements différés) et les tassements de la couche de sable lâche (tassements quasi-immédiats) de l'ordre de 90 %.

Les proportions entre tassements immédiats et tassements différés sont donc inversées au regard du comportement réel de l'ouvrage. Cette situation peut s'expliquer par :

- La présence de lentilles et horizons sableux au sein de la couche argileuse qui permettent une évacuation rapide des pressions interstitielles et par conséquent une augmentation de la vitesse de consolidation,
- La montée assez lente du remblai, qui a permis à la consolidation de se produire progressivement pendant la mise en charge du sol.

Nous avons donc estimé un coefficient de consolidation global de la couche de sols fins compressibles, caractéristique de ce comportement, à partir de la formule suivante :

$$C_v = T_v \times H^2 / t \quad (1)$$

Avec :

- T_v : facteur temps (égal à 2 pour une consolidation considérée comme complète)
- H : longueur de drainage (égale à 10,8 m (couche drainée sur les deux faces))
- t : durée de consolidation (égale à 47 ou 65 jours)

Les résultats obtenus sont les suivants :

Tableau 5. Estimations du coefficient de consolidation vertical.

t (jours)	C_v (m ² /s)
47	$5,7 \cdot 10^{-5}$
65	$4,2 \cdot 10^{-5}$

GEODEPL donne également une estimation des coefficients de consolidation suivant Asaoka et Recordon :

Tableau 6. Estimations du coefficient de consolidation vertical par GEODEPL.

Tassomètre	C_v (m ² /s) selon Asaoka	C_v (m ² /s) selon Recordon
T1	$2,6 \cdot 10^{-5}$	$2,6 \cdot 10^{-5}$
T2	$3,0 \cdot 10^{-5}$	$2,9 \cdot 10^{-5}$
T3	$2,3 \cdot 10^{-5}$	$2,9 \cdot 10^{-5}$

Ainsi, nous avons obtenu un ensemble cohérent de valeurs comprises entre $2 \cdot 10^{-5}$ m²/s et $6 \cdot 10^{-5}$ m²/s.

En réalité, le coefficient de consolidation des horizons plus argileux de la couche compressible est vraisemblablement plus faible que celui que nous avons estimé, mais il est compensé par les horizons sableux qui réduisent la longueur de drainage, ce qui conduit à une durée de consolidation équivalente.

3.3.2. Fluage

Les tassements de fluage sont estimés à partir de la formule suivante :

$$\Delta H_{\alpha} = H \times C_{\alpha} \times \log (t / t_{100}) \quad (2)$$

A partir des courbes de l'évolution du tassement après la fin de la consolidation primaire et en considérant $H = 21,5$ m (épaisseur de la couche de sols fins compressibles sujette au fluage), nous avons obtenu une valeur du taux de consolidation secondaire (C_{α}) de l'ordre de 0,01. Comme pour le coefficient de consolidation vertical, il s'agit d'une valeur moyenne, représentative du comportement de l'ensemble de la couche considérée (les horizons plus argileux ou vasards de cette couche pris indépendamment montreraient probablement des valeurs de C_{α} plus élevées et les horizons plus sableux des valeurs plus faibles).

4. Conclusion

Le suivi du remblai d'essai et l'analyse des résultats obtenus a permis d'atteindre plusieurs objectifs :

- La fiabilisation des modèles géotechniques simplifiés retenus (modules de déformation des couches de sols),
- L'estimation d'un coefficient de consolidation vertical « équivalent » représentatif du comportement réel des sols compressibles mélangés du site sous les charges apportées par les remblais,
- L'estimation d'un taux de consolidation secondaire moyen pour les sols fins compressibles du site.

Par rapport aux études géotechniques produites pour les accès en phase préliminaire, l'exploitation du remblai d'essai a validé les estimations d'amplitudes de tassement préalablement réalisées.

L'exploitation de ce remblai a permis d'adapter le phasage des travaux, d'optimiser certains dimensionnements établis jusqu'alors de manière sécuritaire faute de données (principes de préchargement des ouvrages en terre), et de fiabiliser le planning du chantier par rapport aux vitesses de tassements constatées.

Cet essai en vraie grandeur s'est donc avéré particulièrement bien adapté au contexte géotechnique du site qui, par sa complexité et son hétérogénéité, rend difficile l'établissement de modèles géotechniques à la fois simples et représentatifs du comportement réel des ouvrages.

5. Références bibliographiques

- Recordon E. (1988). Tassement des ouvrages au cours du temps - Méthode d'interprétation des mesures. *Ingénieurs et architectes suisses n°7*.
- Al-Shamrani M. (2004). Applying the hyperbolic method and C_{α} / C_c concept for settlement prediction of complex organic-rich soil formations. *Engineering geology 77 (2005) pp. 17-34*.
- Philipponnat G., Hubert B. (1997). Fondations et ouvrages en terre. *Eyrolles, 576 pages*.