

MAITRISE DE LA CONSOLIDATION D'UN GRAND REMBLAI ROUTIER : UNE PROGRESSION PAR ETAPES

MANAGING THE CONSOLIDATION OF A LARGE ROAD EMBANKMENT: A STEP BY STEP ENGINEERING PROCESS

Benoit PEZOT¹, Parfait POUEMI², Jean MOUFO³, Emmanuel KENMOGNE⁴, Charles SPAULDING⁵

¹ Sol Expert International, Paris, France

² Soletanche Bachy, Douala, Cameroun

³ Labogenie, AGMO, Douala, Cameroun

⁴ Fugro Group, Douala, Cameroun

⁵ Soletanche Bachy, France

RÉSUMÉ – Malgré l'impossibilité d'établir un modèle stratigraphique décrivant le sous-sol, la consolidation sous un grand remblai routier culminant à 8 m sur des terrains fortement compressibles d'environ 20 m d'épaisseur a été pilotée avec succès. La méthode a permis de déterminer le moment de l'obtention sous surcharge du degré de consolidation nécessaire à la stabilité des remblais définitifs vis-à-vis des tassements à long terme.

ABSTRACT – Despite the complexity for establishing a geotechnical model of the subsoil, the targeted consolidation level was reached successfully under a large road embankment of 8 m height over a 20 m thick layer of compressible soil.. The method developed allowed to safely determine the time when consolidation under surcharge reached the necessary level to ensure long-term dimensional stability of the road.

1. Introduction

Le projet du second pont sur le Wouri est réalisé en conception-réalisation pour le compte du gouvernement du Cameroun par un groupement d'entreprises Vinci comprenant Soléthane-Bachy et Sogea Satom. Sol Expert International a piloté le phasage de réalisation des remblais de grande hauteur réalisés sur des terrains fortement compressibles, en particulier la « Bretelle » d'accès au rond-point Deido, formant l'accès Est.

La particularité de cette mission est la difficulté qui a été rencontrée de disposer d'un modèle de comportement du sous-sol pour les analyses, et la nécessité qui en a résulté de se baser sur les méthodes de rétro-analyse par approches successives, avec le souci de rester dans les délais prévus de livraison du projet.

Chacune des approches successives pour l'élaboration de ce modèle est utile et correspond à une révision partielle ou complète de l'approche précédente :

- Approche A : A l'aide des sondages et des essais de laboratoire associés
- Approche B : A partir de l'analyse d'un remblai d'essai sur une zone du site
- Approche C : A partir de l'analyse de paliers dans les chargements par remblai
- Approche D : A partir de l'analyse du comportement sous surcharge

2. Caractéristiques de l'ouvrage

La bretelle d'accès au Port Autonome de Douala (PAD) est un ouvrage en terre de 440 m de long qui mettra en communication directe en largeur 2 x 2 voies le PAD et le nouveau Pont en passant par le nouveau rond-point SCDP.

Elle démarre en profil rasant du giratoire PAD et atteint le niveau du giratoire SCDP avec un remblai de 8,5 m de hauteur. Sa largeur en crête est de 19 m.

A l'est, l'ouvrage en terre s'adosse à la terrasse de l'ancienne berge du Wouri à partir du profil PT19. Les remblais sont majoritairement constitués de pouzzolane ainsi que les remblais de surcharge. La Spécification technique du projet est que le tassement résiduel absolu maximum des ouvrages en terre est fixé à 8 cm sur une durée de dix ans.

Tableau 1 : Hauteurs de remblai définitif formant la Bretelle

Section étudiée	PT11	PT13	PT15	PT17
Hauteur de remblai définitif sur TN (m)	5,0	5,2	6,8	7,2

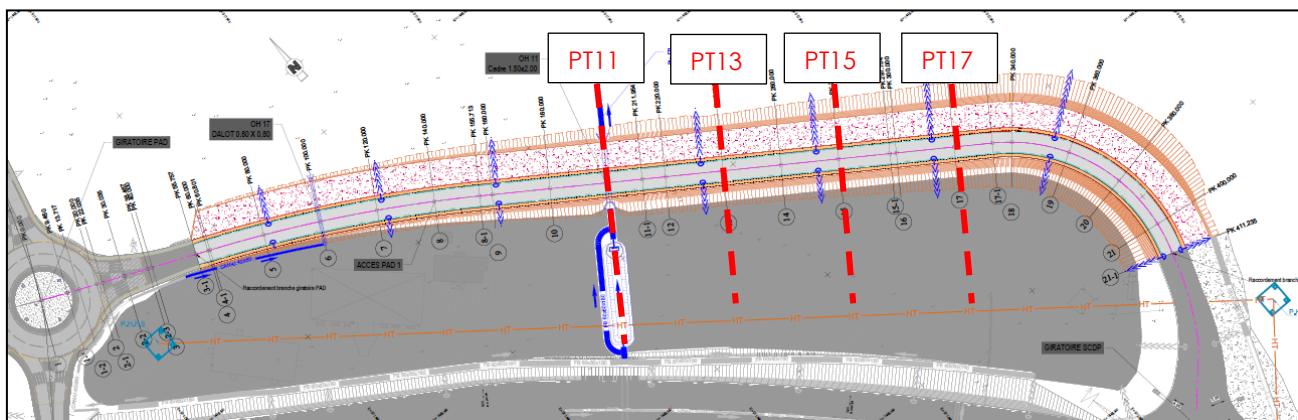


Figure 1 : Bretelle entre les giratoires PAD menant au pont et au port à gauche et SCDP à droite.

3. Contexte géologique et hydraulique



Figure 2 : Situation du projet dans l'estuaire du Wouri.

Les terrains rencontrés sur le projet sont des dépôts estuariens du Quaternaire. Composés d'argiles et de sables, ils reposent sur un substratum appartenant à la série du Wouri (Pliocène). Le substratum est rencontré à partir de -30.0/-35.0mNGC dans le lit actuel du fleuve.

A la construction du pont dans les années 50, le fleuve se partageait en deux bras séparés par un banc de sable central. Depuis les années 1970 le bras Est sur lequel sont réalisés les accès Est a été obstrué et remblayé en terre-plein pour permettre l'agrandissement du port. Les données piézométriques montrent une nappe phréatique légèrement variable avec la marée et les saisons avec un niveau moyen +1.50 NGC, +1.43 NGC pendant les basses eaux et +1.72 NGC pendant les hautes eaux.

4. Synthèses des campagnes de reconnaissance géotechnique – Approche A

Les campagnes de sondages au pénétromètre dynamique lourd, au pénétromètre statique et carottés sont réalisées en plusieurs phases en 2014 et 2015. Elles mettent en évidence des sols fins compressibles sur 21,5 m dans la zone la plus critique avec un substratum à la cote approximative de -32 NGC remontant à partir de PT16 et vers l'ancienne berge du fleuve et rejoignant l'ancienne terrasse supportant la ville de Douala.

La stratigraphie des terrains compressibles est d'une extrême hétérogénéité verticale et horizontale. Les mouvements du fleuve dont le débit et les niveaux varient et dont les ramifications et méandres n'ont cessé d'évoluer, déposant ici et recreusant partiellement là dans d'anciens dépôts ont généré ces formations. On retrouve des sables silteux, des silts sableux et des passages d'argiles molles plus ou moins organiques sans qu'il soit possible de décrire un ensemble organisé jusqu'au substratum peu compressible.

En l'absence de données œdométriques, l'approche A correspondant à une étude d'exécution ne peut être basée que sur des corrélations avec le pénétromètre statique qui conduiraient à estimer que les tassements à l'axe de l'ouvrage dépasseraient 3 m.

5. Remblai d'essai – Approche B

Ces difficultés ont conduit à orienter l'analyse vers la recherche de paramètres globaux par section du projet. L'approche B suivante consiste à réaliser un remblai sur la zone jugée la plus critique de la bretelle et à observer son comportement.

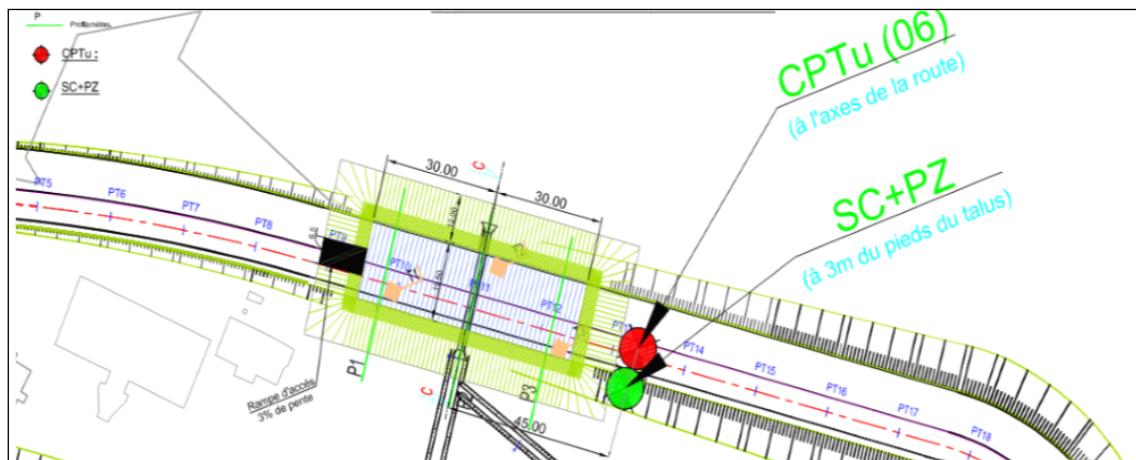


Figure 3 : Vue en plan du remblai d'essai.

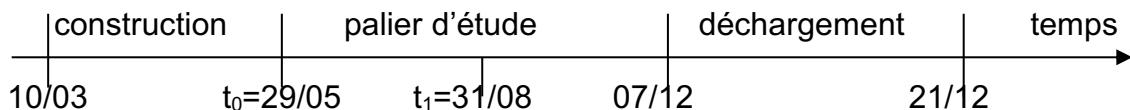
5.1- Géométrie et instrumentation du remblai d'essai

Le remblai d'essai (Juignet et al. 2016) a été construit autour du point PT11 sur 84 m de longueur, 31 m de largeur en pied de talus. Il est bâti sur 8m de hauteur avec un talus de 3H/2V ce qui fait une largeur en crête de 7m et une longueur de 60m.

Il est fait du bas vers le haut de 1.50m de pouzzolane qui fait office remblai de compensation des tassements, 1.80m de sable argileux et 4.70m de pouzzolane. L'instrumentation est constituée de (03) trois tassomètres à plaque, (03) trois profilomètres et (01) un piézomètre ouvert.

5.2- Analyse des données relevées

C'est le tassomètre T2 qui décrit mieux le comportement du remblai de par sa position centrale. La chronologie du remblai d'essai est résumée sur le graphique suivant :



5.2.1. Paramètres de consolidation primaire

Le chargement constant sous la surcharge en place de t₀ (29 Mai) à t₁ (31 août 2015) permet l'analyse des données pour la consolidation primaire.

σ'_0 : Contrainte initiale à mi-couche (kPa)	92
Sdp : Tassement primaire sous palier en fin de consolidation (cm)	178
σ'_s : Contrainte effective sous surcharge (kPa)	196
h : Epaisseur compressible (m)	21.5
h.Cc/(1+e ₀) : Compressibilité primaire globale	5.69
Cc/(1+e ₀) : Coefficient de compressibilité primaire pour h = 21,5 m	0.25

La connaissance du coefficient de compressibilité global sur la section PT11 permet d'estimer le tassement de consolidation primaire de l'ouvrage définitif.

σ'_f : Contrainte effective sous ouvrage définitif (kPa)	157
R : ratio de surcharge (%)	177%
Sfp : Tassement primaire final sous l'ouvrage (m)	1.25

Le « ratio de surcharge » (en pourcentage) correspond au rapport entre l'augmentation de contrainte sous surcharge et l'augmentation de contrainte finale :

$$R = \frac{\sigma'_s - \sigma'_0}{\sigma'_f - \sigma'_0}$$

5.2.2. Paramètres de consolidation secondaire

L'estimation du paramètre global de consolidation secondaire est tributaire de deux dates fondamentales : L'origine des temps t₀ ; qui dans notre analyse est considérée comme étant la date de fin du chargement (29 Mai) et la date estimée de début des tassements secondaires t₁ (31 août 2015).

En pratique la méthode consiste à tracer le graphique des tassements en fonction du temps compté sur une échelle Logarithmique. Ces tassements apparaissent au-delà de la date t₁ suivre une droite dont il est possible de déterminer la tendance sous la forme :

$$S(t) = A \cdot \log(t) + B$$

Dans laquelle A représente par analogie avec le modèle de consolidation secondaire h.C₂e/(1+e₀).

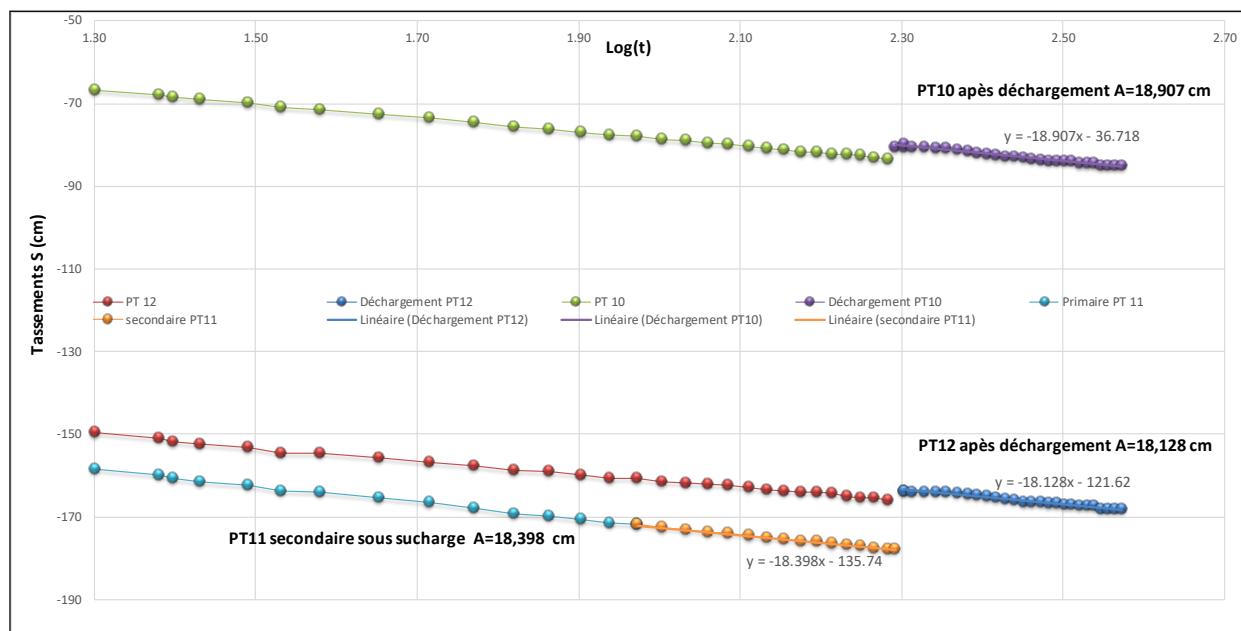


Figure 4 : Consolidation secondaire en fonction du temps (échelle logarithmique).

On obtient donc au PT11 : $h.Cae/(1+e_0) = 18,4 \text{ cm ou } 0,184 \text{ m.}$

Cette valeur se confirme sur les tassomètres T1 et T3 respectivement aux PT10 et PT12 qui ont été suivis pendant plus de 180 jours après décharge.

Si l'on fait l'hypothèse $h = 21,5 \text{ m}$, on obtient le coefficient de consolidation secondaire : $Cae/(1+e_0) = 0,01$. On observe également que le rythme des tassements secondaire semble se conserver même après déchargement du remblai d'essai.

5.2.3. Objectif de tassement

L'objectif de tassement sur le profil PT11 est estimé en ajoutant au tassement de consolidation primaire sous l'ouvrage calculé plus haut, un tassement de consolidation secondaire estimé entre la date de livraison de la voirie (1037 jours) et la date de garantie (4960 jours).

$$Sfs = h \cdot \frac{Cae}{(1+e_0)} \cdot \log\left(\frac{t_2}{t_1}\right) = 0,13m$$

Le tassement de 1,78 m obtenu sous remblai d'essai a donc nettement dépassé l'objectif calculé de 1,38 m au PT11.

6. Analyse des déformations et affinement des paramètres de compressibilité des terrains en place – Approche C

Sur le reste de l'ouvrage, atteindre l'Objectif de tassement signifie atteindre le tassement $Sfp + Sfs$ propre à chaque section. Pour cela, ce qu'on appellera ici « préchargement » (l'ouvrage définitif y compris les remblais de compensation des tassements) est mis en place puis est surmonté d'une « surcharge », destinée à être ôtée en fin de consolidation.

Le préchargement et la surcharge sont ré-évalués au cours des approches C et D en tenant compte de la durée d'application possible de la surcharge selon le planning du projet. Plus cette durée est courte, plus la surcharge devra être importante.

Au cours de la réalisation du projet, chaque section d'étude est instrumentée par un tassomètre à plaque. On s'intéressera ici en particulier aux sections PT13, PT15 (épaisseur compressible supposée 20,5 m) et PT17 (respectivement 12,0 m).

6.1- Evaluation de la consolidation primaire

Un palier de 4 à 5 semaines dans la montée du remblai est utilisé pour une nouvelle estimation des paramètres de compressibilité globaux. Cette méthode revient à disposer d'un nouveau remblai d'essai limité dans le temps et adapté à chaque section.

Le modèle de sol comporte pour chaque section une couche unique d'épaisseur h . La contrainte effective et les variations d'indice sont estimés au centre de cette couche et à l'axe des remblais (sous les plaques de tassement) puis appliqués à toute l'épaisseur.

Sdp étant le tassement primaire sous palier en fin de consolidation, une projection sur sa valeur est possible grâce à la construction d'Asaoka.

Ce qui permet d'approcher plus précisément le paramètre de compressibilité primaire du sol $C_c / (1+e_0)$ grâce à la connaissance des paramètres de l'équation œdométrique :

$$Sdp = h \cdot \frac{C_c}{(1+e_0)} \cdot \log \left(\frac{\sigma'_d}{\sigma'_p} \right)$$

Section étudiée	PT13	PT15	PT17
Contrainte effective initiale au centre de la couche σ'_0 (kPa)	96	96	46
Contrainte de préconsolidation au centre de la couche σ'_p (kPa)	121	116	73
Contrainte effective sous palier en fin de consolidation σ'_d (kPa)	136	140	120
Tassement primaire sous palier en fin de consolidation Sdp (m)	0,51	0,85	0,69
Compressibilité primaire approchée déduite $C_c/(1+e_0)$	0,31	0,36	0,25

Une nouvelle estimation du tassement de consolidation primaire final Sfp est proposée.

Section étudiée	PT13	PT15	PT17
Contrainte effective finale sous l'ouvrage σ'_f (kPa)	159	175	168
Tassement primaire final sous l'ouvrage Sfp (m)	0,94	1,56	1,13

6.2- Evaluation de la consolidation secondaire

Le palier de chargement n'apporte pas de nouvelle estimation du paramètre de consolidation secondaire.

Le tassement de consolidation secondaire final Sfs est à estimer entre la livraison de l'ouvrage ($t_1 = 1,5$ ans environ) et la date postérieure de 10 ans ($t_2 = 11,5$ ans). La valeur calculée est $Sfs = 0,18$ m pour toutes les sections, indépendamment du chargement.

6.3- Estimation des charges à mettre en place

La hauteur de surcharge H_{sur} surmontant le préchargement doit permettre de générer le tassement-objectif $Sfp + Sfs$ en une durée maximale de 180 jours. Pour cette durée, il est observé sous remblai d'essai (approche B) que le degré de consolidation primaire correspondant est supérieur à 90%.

La surcharge est dimensionnée de telle sorte que 90% du tassement primaire sous préchargement et surcharge dépassent le tassement-objectif. Pour cela un ratio de surchargement relativement peu élevé de 120% est requis. Soit en pratique :

Section étudiée	PT13	PT15	PT17
Tassement-objectif Sfp + Sfs (m)	1,12	1,74	1,31
Contrainte effective sous surcharge fin conso σ'_s (kPa)	172	188	193
Ratio de surchargement R (%)	121 %	116 %	120 %

7. Analyse du comportement sous surcharge et justification de la fin de la consolidation – Approche D

7.1- Evaluation de la consolidation primaire

Au 20 février 2017, soit après 3,5 mois sous surcharge, une nouvelle estimation de la compressibilité primaire est effectuée, c'est l'approche D. Au-delà de cette date, il semble que le comportement secondaire domine et que l'évolution ne s'explique plus par le modèle de compressibilité primaire.

La construction d'Asaoka avec différents intervalles de temps multiples d'une semaine est utilisée à ce nouveau palier de contraintes nettement plus élevé dont l'analyse doit être considérée comme plus fiable.

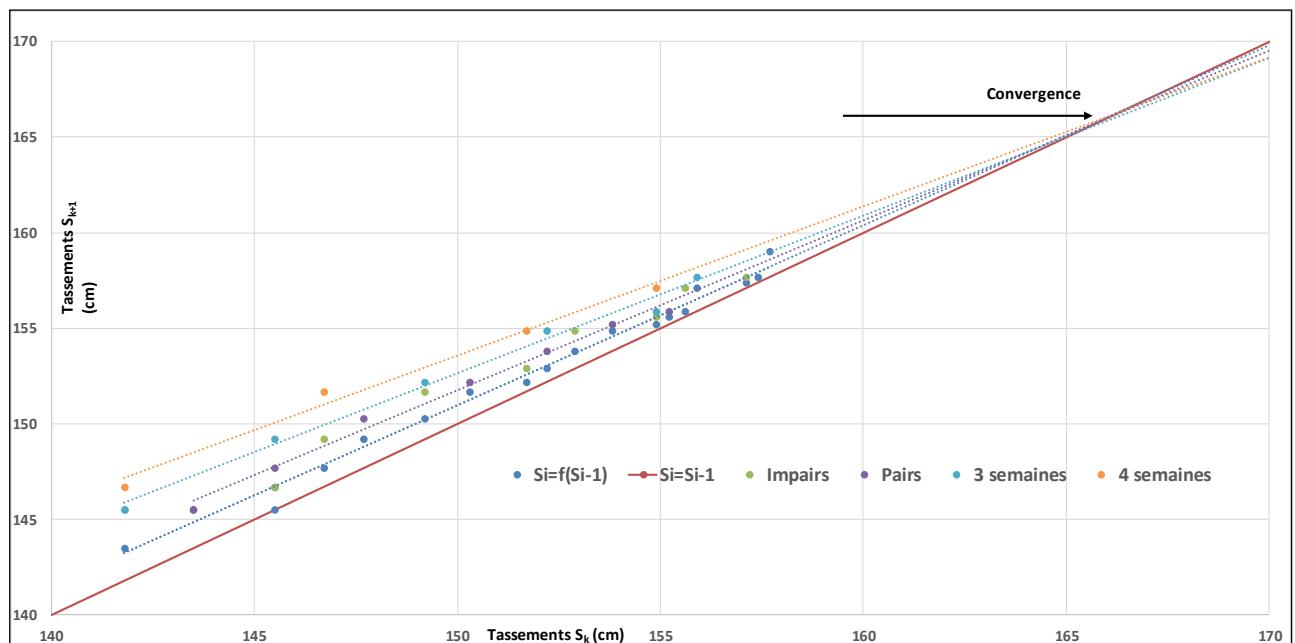


Figure 5 : Constructions d'Asaoka en PT15

De nouvelles mesures de densité en place dans le remblai permettent également d'affiner les données retenues légèrement différentes de celles de l'approche C.

Section étudiée	PT13	PT15	PT17
Contrainte effective sous surcharge en fin de consolidation σ'_s (kPa)	180	205	202
Tassement primaire sous surcharge en fin de consolidation Ssp (m)	1,24	1,73	1,22
Compressibilité primaire approchée $C_c/(1+e_0)$	0,32	0,34	0,23

Il est intéressant de noter que la compressibilité primaire obtenue à l'approche C ne s'écartait que de 10% de la compressibilité primaire finalement obtenue à l'approche D.

Les valeurs obtenues permettent de définir un nouvel objectif de tassement Sfp :

Section étudiée	PT13	PT15	PT17
Contrainte effective finale sous l'ouvrage σ'_f (kPa)	165	184	178
Ratio de surcharge R (%)	121 %	124 %	118 %
Tassement primaire final sous l'ouvrage Sfp (m)	0,99	1,56	1,07

7.2- Evaluation de la consolidation secondaire

A partir du 13 mars 2017, date au-delà de laquelle le comportement secondaire est prédominant, les observations sont effectuées sur toute la longueur de la bretelle.

L'examen des vitesses de tassement et leur analyse sur une échelle de temps logarithmique donne une estimation du paramètre de compressibilité secondaire.

Section étudiée	PT13	PT15	PT17
Vitesse de tassement au 8 mai 2017 (mm/sem sur 4 semaines)	3,8	4,0	2,0
Coefficient A lu sur les graphiques (m sur 8 semaines)	0,20	0,21	0,11
Valeur estimée de $C_{ae}/(1+e_0)$	0,01	0,01	0,01

Ce qui confirme les valeurs antérieures pour les valeurs de h considérées.

7.3- Obtention des objectifs de tassement

Il ne reste qu'à vérifier que les tassements ont atteint les objectifs correspondant à la consolidation primaire et secondaire sous l'ouvrage définitif :

Section étudiée	PT13	PT15	PT17
Tassement-objectif Sfp + Sfs (m)	1,18	1,74	1,25
Date d'atteinte de l'objectif	16 oct 2017	30 nov 2017	08 jan 2018

8. Conclusion

En dépit des difficultés pour établir un modèle fiable des conditions géotechniques, et en présence de tassements de consolidation pouvant atteindre 2m sous le poids des remblais, la méthode présentée a permis la réalisation du projet dans les coûts et délais impartis, tout en gardant la maîtrise du risque des tassements résiduels sous chaussées à 10 ans.

Cette méthode comprend 4 phases successives au cours desquelles les paramètres géotechniques sont progressivement affinés. On retiendra principalement l'évolution du coefficient de compressibilité primaire tel que résumé dans le tableau ci-après :

Approches du paramètre $C_c/(1+e_0)$	PT13	PT15	PT17
Approche A	Non effectuée		
Approche B	0,25		
Approche C	0,31	0,36	0,25
Approche D	0,32	0,34	0,23

9. Références bibliographiques

Asaoka A. – 1978 Observational procedure of settlement prediction. Soils and foundations, vol 18, N°4, pp 87 – 101.

Juignet A., Lefevre C., Helas O. – Ouvrages d'accès au second pont sur le Wouri : Fiabilisation du projet grâce à un remblai d'essai - JNGG 2016