

INTERNATIONAL SOCIETY FOR SOIL MECHANICS AND GEOTECHNICAL ENGINEERING



This paper was downloaded from the Online Library of the International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE). The library is available here:

<https://www.issmge.org/publications/online-library>

This is an open-access database that archives thousands of papers published under the Auspices of the ISSMGE and maintained by the Innovation and Development Committee of ISSMGE.



GRAND PRECHARGEMENT: INSTRUMENTATION ET ANALYSE DES RESULTATS LARGE PRELOADING EMBANKMENT: MONITORING AND DATA ANALYSIS

M. Londez¹ H. Gonin² J.F. Dies³

¹Directeur MECASOL, Rungis, France

²Directeur SIMECSOL, Plessis-Robinson, France

³MECASOL, Rungis, France

Résumé : le procédé de stabilisation des sols compressibles par prechargement et consolidation par drains verticaux a été appliqué sur le tracé d'une ligne ferroviaire à grande vitesse (TGV). Etant donné les contraintes d'exploitation particulièrement sévères des TGV, une instrumentation a été mise en place pour aider à la prévision des tassements résiduels à long terme.

Outre le suivi de la consolidation, les mesures différentielles de tassement par tassomètres magnétiques et les mesures de pression interstitielle ont permis de préciser l'importance des évolutions secondaires à long terme, dont dépendent en grande partie les tassements résiduels à prévoir.

La méthode d'interprétation utilisée est originale mais simple dans son principe.

Elle montre le parti que l'on peut tirer de la conjonction dans un même horizon stratigraphique des mesures de pression interstitielle et des mesures de tassement différentiel.

PRESENTATION DU CHANTIER

Le remblai R3 de la ligne du TGV Nord fait partie de l'ouvrage de franchissement du canal de la Haute-Colme et de la rivière Aa, situé dans les communes de Watten, Holque et Kuminghem (région Nord-Pas-de Calais, France). Il constitue le remblai d'accès à la culée Ouest de cet ouvrage. Ce remblai, de 300m de long et 10m de haut, repose sur une série de dépôts alluviaux récents de 1 à 20m d'épaisseur, le substratum étant constitué par l'argile Yprésienne (argile des Flandres). Les sols d'assise étant compressibles, de faible résistance au cisaillement, avec une distribution irrégulière de dépôts organiques, argileux, ou sableux, les études et les travaux ont comporté successivement :

- reconnaissance géotechnique préalable le long de l'axe du tracé;
- consultation des Entreprises sur le projet de base;
- reconnaissances complémentaires, comportant notamment des investigations de part et d'autre de l'axe;
- définition du projet d'exécution et prévisions du comportement du remblai et de son assise;
- réalisation du projet, avec suivi et interprétation des mesures;
- adaptation des phases finales de remblaiement, avec surcharge provisoire, en fonction des résultats des mesures.

Le chantier et les mesures se sont déroulés pendant l'année 1991 et la première moitié de 1992. Les différentes phases ont été les suivantes :

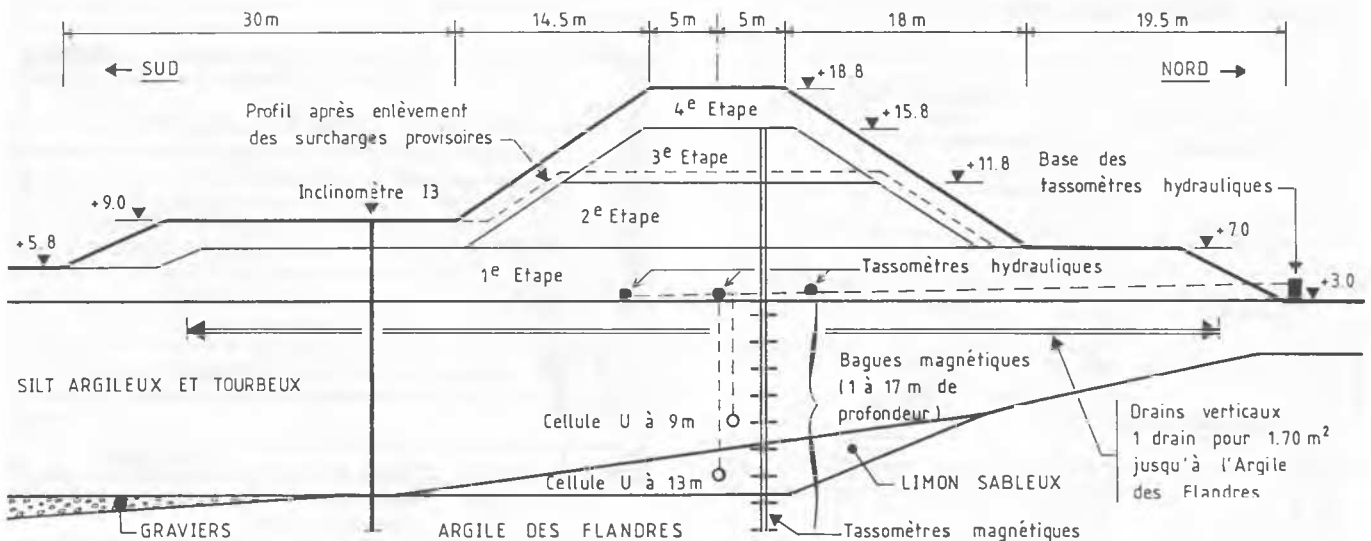


Fig 1. Coupe du remblai de préchargement et position des capteurs: Bagues magnétiques pour les tassements et Cellules U pour les pressions interstitielles.

- décapage des terrains superficiels, sur 1,50m d'épaisseur environ avec purge de poches de tourbe localisées et mise en place de sable marin jusqu'à 0,50m au-dessus du terrain naturel, avec engagemment en matériau graveleux 0-90mm;
- mise en place de drains plats verticaux atteignant l'Argile des Flandres, suivant un maillage triangulaire de 1,4m de côté;
- mise en place de l'instrumentation (décembre 90 -janvier 91);
- mise en oeuvre de sable, jusqu'à la cote NGF +4,55, pour protéger l'instrumentation et constituer la plate-forme de chargement, sur une épaisseur variant de 0,5m à 1,10m;
- début des étapes de chargement avec suivi de l'instrumentation.

Seul le profil P3, placé à 200m à l'Ouest de la culée du viaduc, dans les conditions de terrains les plus critiques est analysé ici. La figure (1) de la page précédente présente la configuration générale des sols à cet emplacement, et l'instrumentation mise en place : trois cellules de mesures de tassement en surface, deux cellules de mesure de surpression interstitielle, un tube inclinométrique côté Sud, un tube télescopique vertical dans l'axe, équipé de tassomètres magnétiques tous les 2m jusqu'à 17m de profondeur.

Les différentes étapes de chargement sont également indiquées :

- Première étape (environ cote +7,00) : Janvier à Mars 1991;
- Deuxième étape (environ cote +12,00) : Avril à Août 1991;
- Troisième étape (environ cote +16,00) : Août 1991 à Mars 1992;
- Quatrième étape (environ cote +18,50) : Mars à Juin 1992.

En juin 1992, les surcharges additionnelles ont été enlevées, le remblai étant ramené à la cote de projet, environ +13,00.

Les lectures des appareils encore en fonctionnement se poursuivent avec une cadence mensuelle.

CARACTERISTIQUES GEOTECHNIQUES

Au droit du profil 3 la stratigraphie comporte de haut en bas : (fig.2)

- **Dépôts quaternaires :**
0-11m - Alternance de silts argileux parfois tourbeux, et de fins lits de sable silteux ou de sable fin. Le haut de la couche est consolidé par dessiccation. Quelques dépôts superficiels de tourbe pure (2-3m) ont été purgés avant travaux.
11-13m - Sables grossiers et galets, mêlés de silts organiques, le tout consolidé.
- **Yprésien :** Argile des Flandres, altérée sur 3 à 4m.

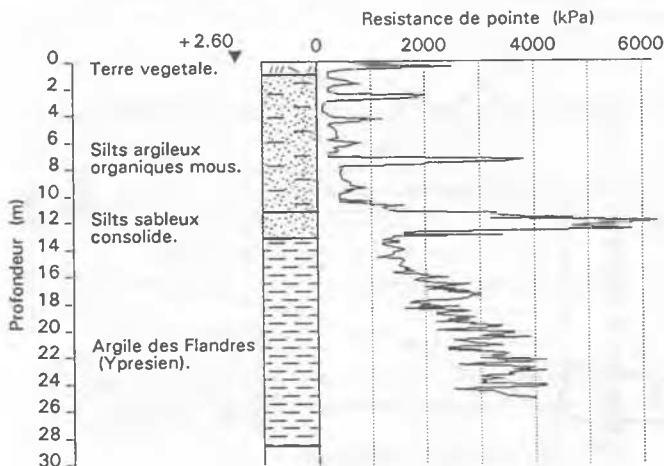


Fig 2. Coupe géotechnique du sol.

Le profil étudié étant situé en bord de vallée l'épaisseur des formations quaternaires est variable. En particulier le niveau sablo-graveleux tend à disparaître au Nord et à s'appauvrir en matériaux grossiers (d'où quelques écarts entre les stratigraphies des fig.2 et fig.3 qui correspondent à des points distants de 20 à 30m).

Les caractéristiques des divers niveaux retenues pour les études sont résumées ci-après :

Silts argileux organiques :

$$\gamma = 16,5 \text{ kN/m}^3, c_u = 25 \text{ kN/m}^2, \varphi_{cu} = 16^\circ, \varphi' = 27^\circ;$$

$$C_c/(1+e_o) = 0,28, C_\alpha (\text{fluage}) = 0,013, C_v = 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}.$$

Argile des Flandres :

$$C_c/(1+e_o) = C_g/(1+e_o) = 0,07, P_c = \text{poids terres} + 250 \text{ kN/m}^2.$$

Le profil pénétrométrique (fig.2) résume clairement les conditions géotechniques :

- faible résistance et forte compressibilité des silts argileux.
- le caractère tourbeux de la formation induit une forte tendance au tassement secondaire.
- la partie supérieure de l'Yprésien peut induire quelques tassements non pris en considération ici.

RESULTATS DES MESURES ET INTERPRETATION

Les résultats des mesures de tassement sont reportés sur la figure (3).

Les représentations "isochrones" des déplacements verticaux mesurés (en abscisses) en fonction de la profondeur (en ordonnées), fait apparaître une différence de comportement entre la partie supérieure des couches compressibles et leur partie inférieure :

- couche de 1 à 6m : les tassements sont importants mais ils se stabilisent après chaque étape de remblaiement (isochrones parallèles).
- couche de 7 à 11m : le tassement est plus faible mais la stabilisation est beaucoup plus lente. A 9m de profondeur, aucune tendance à la stabilisation n'apparaît à la fin de la 3ème étape de chargement (408ème jour).

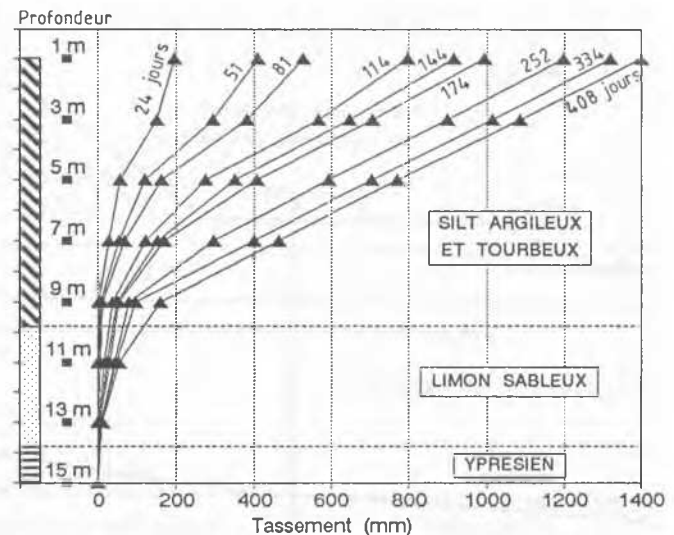


Fig 3. Isochrones du tassement en fonction de la profondeur.

Les résultats des mesures de pressions interstitielles à 9m et à 13m de profondeur sont reportés sur la figure (5) en fonction du temps. On note la bonne concordance entre la montée du remblai et les surpressions mesurées.

Trois déformées latérales du tube inclinométrique ont été tracées sur la figure (4), respectivement en fin de 2^{ème} étape de chargement, de 3^{ème} étape et de 4^{ème} étape.

Le plus grand déplacement latéral se produit vers 8m de profondeur, dans la zone où l'on a mesuré les plus grandes vitesses de tassement en fin de 3^{ème} étape.

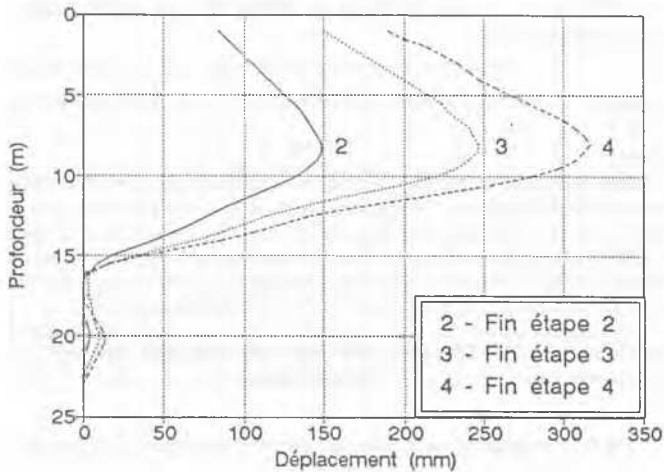


Fig 4. Déplacements horizontaux mesurés à l'inclinomètre.

Interprétation En Fin De Troisième Etape

Au terme de la 3^{ème} étape de préchargement à 13m au-dessus du Terrain Naturel, les vitesses de tassement constatées n'étaient pas compatibles avec les impératifs d'exploitation de la voie.

Il a donc paru souhaitable de préciser l'état de la consolidation primaire et la part du tassement à imputer à la dissipation des pressions interstitielles résiduelles, pour améliorer l'estimation du tassement différé (fluage) à prévoir, une fois la surcharge enlevée et la voie mise en service.

L'interprétation qui suit utilise les mesures faites à l'aide des tassomètres profonds et des cellules de pression interstitielle.

En théorie, la consolidation suppose une proportionnalité entre variation volumique et variation de pression interstitielle, soit, pour une couche compressible uniformément chargée, un rapport constant M entre le tassement s et la diminution de pression interstitielle moyenne \bar{u}_w , (moyenne des pressions interstitielles dans le volume compressible).

Lorsqu'on dispose de mesures in-situ et que l'on peut évaluer la valeur moyenne \bar{u}_w par ajustement d'un modèle théorique, le graphe $s(\bar{u}_w)$ doit faire apparaître la pente $M = ds/d\bar{u}_w$.

La nécessité de recourir à une valeur moyenne \bar{u}_w calculée est due au fait que les mesures de pression interstitielle sont ponctuelles alors que les mesures de tassements intègrent les déformations dans l'épaisseur d'une couche.

En fait, $s(\bar{u}_w)$ n'est pas linéaire et les variations constatées de la pente, permettent certaines interprétations, par exemple :

- Au début de la consolidation, le tassement déviatorique immédiat puis le tassement des couches rapidement consolidables augmentent la pente $ds/d\bar{u}_w$ qui est alors supérieure à la valeur M théorique.

- En phase intermédiaire, la pente diminue et se rapproche de M . L'écroutissage du sol se traduit par une diminution régulière de la pente.
- Vers la fin de la consolidation, la vitesse de $d\bar{u}_w/dt$ tend vers zéro et s'il subsiste un fluage, ds/dt ne s'annule pas. Il en résulte une augmentation de la pente $ds/d\bar{u}_w$ qui devient infinie lorsque l'on ne décèle plus aucune diminution de \bar{u}_w .

En résumé, l'étude va comporter trois étapes :

- Evaluation des contraintes moyennes $\bar{\sigma}$ dues au remblai dans les couches compressibles au niveau des capteurs de mesure.
- Ajustement d'un modèle de consolidation radiale (drains verticaux), ou verticale si le milieu est stratifié, sur les mesures de pression interstitielle.
- Comparaison à chaque instant, du tassement différentiel relatif à la couche compressible et de la dissipation de la moyenne des pressions interstitielles recalculée par le modèle de consolidation.

Le calcul des contraintes moyennes $\bar{\sigma}$ a été fait dans les hypothèses simplificatrices de l'élasticité, en négligeant la raideur propre du remblai. Les valeurs théoriques de $\bar{\sigma}$ sont représentées sur la figure (5).

La recherche d'un modèle de la consolidation avec drainage radial vers les drains verticaux et drainage vertical vers les horizons les plus perméables a nécessité la prise en compte de la position (coordonnées r, z) du capteur de mesure par rapport aux limites drainées. Plus précisément les rapports $\rho = r/R$ et $\zeta = z/H$.

L'ajustement sur les résultats des mesures en fonction du temps, concerne l'amplitude des pressions, les pentes ou vitesses de dissipation, les courbures. Les amplitudes et les pentes sont liées à la constante de temps H^2/c_v ou R^2/c_r , mais les courbures dépendent surtout du paramètre de localisation ρ ou ζ .

Etant donné le nombre de paramètres et l'étendue de leur domaine de variation, un programme de calcul spécifique a été développé.

La meilleure correspondance (fig 5) a été obtenue en choisissant une consolidation de type vertical et en supposant les capteurs de pression relativement proches d'une couche drainante.

Pour la cellule à 9m (base de l'argile molle) on a déterminé ainsi un rapport $H^2/c_v = 1$ an et une localisation $z/H = 0,75$.

Pour la cellule à 13m (argile ferme) on a trouvé 3 ans et $z/H = 0,8$.

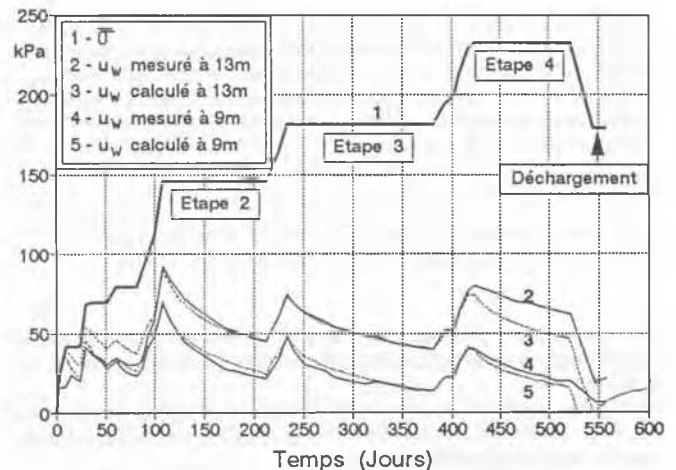


Fig 5. Histogrammes des pressions interstitielles u_w mesurées comparées aux valeurs calculées (résultat de l'ajustement).

Comparaison Du Tassement Relatif $\bar{\epsilon}_z$ à La Pression Moyenne \bar{u}_w

L'analyse a porté sur les tassements mesurés dans la couche compressible, entre 1m et 11m de profondeur, comparés aux indications de la cellule à 9m. Aucun diagramme n'a été tracé pour la cellule à 13m, les tassements mesurés au niveau des argiles profondes étant négligeables.

Les courbes de la figure (6) représentent les variations de \bar{u}_w en fonction des tassements relatifs $\bar{\epsilon}_z = s/\Delta z$ correspondants respectivement :

- à la partie de la couche comprise entre 1 et 7m ($\Delta z = 6m$).
- à la partie comprise entre 7m et 11m ($\Delta z = 4m$).

La représentation inverse $\bar{u}_w(\bar{\epsilon}_z)$, avec le tassement relatif en abscisses, est d'une lecture plus commode que la représentation directe $\bar{\epsilon}_z(\bar{u}_w)$. Cependant, il faut garder présent à l'esprit que les "pentes" en mm/kPa ou % par kPa évoquées ci-après, sont les inverses des pentes dy/dx des courbes de la figure (6).

Seules les portions des courbes correspondant aux diminutions de \bar{u}_w pendant les paliers de chargement sont à considérer.

On relève les valeurs suivantes de la pente $d\bar{\epsilon}_z/d\bar{u}_w$:

couche 1 à 7m : 0,08% par kPa en deuxième étape, écouvissage marqué en troisième étape.

couche 7 à 11m : 0,04% par kPa en deuxième étape, 0,12% par kPa en troisième étape.

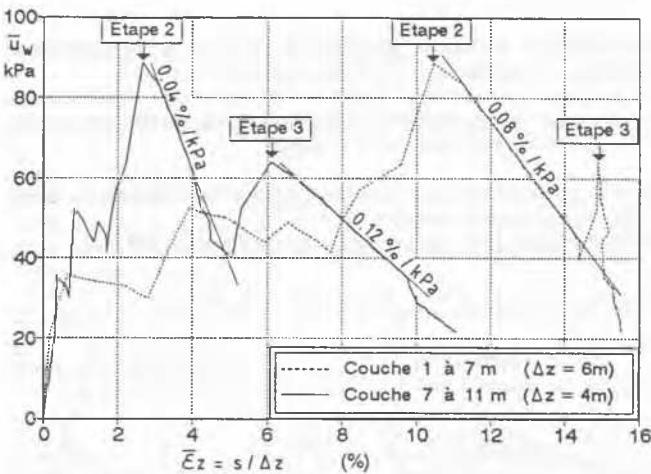


Fig 6. Relations $\bar{u}_w(s/\Delta z)$ montrant les effets de l'étape 3 :
- écouvissage de 1 à 7m - fluage entre 7 et 11m.

En conclusion le préchargement joue son rôle de consolidation et d'écouvissage des couches compressibles comprises entre 1m et 7m de profondeur.

En dessous, entre 7m et 11m de profondeur, un fluage avec une pente $d\bar{\epsilon}_z/d\bar{u}_w$ donnée par la différence $0,12\% - 0,04\% = 0,08\%$ par kPa apparaît à la troisième étape de chargement.

Concernant une épaisseur de 4m, ce fluage, noté s_f , correspond à un rapport $ds_f/d\bar{u}_w = 3mm/kPa$.

On en déduit la vitesse de fluage :

$$ds_f/dt = (ds_f/d\bar{u}_w) \times (d\bar{u}_w/dt)$$

où $d\bar{u}_w/dt$ est la pente de la distribution $u_w(t)$ donnée par le modèle de calcul (fig.7).

Si on admet une relation $s_f(t)$ logarithmique, c'est-à-dire :

$$ds_f/dt = A/(t-t_0)$$

Les coefficients A et t_0 sont déterminés par deux valeurs particulières de $d\bar{u}_w/dt$. Par exemple au début et à la fin de la troisième étape de chargement, on relève sur la figure (7) :

$d\bar{u}_w/dt = 0,57 \text{ kPa/j}$ à $t = 226$ jours et $0,158 \text{ kPa/j}$ à $t = 363$ jours.

On en déduit $t_0 = 173$ jours et $A = 90mm$.

L'application est immédiate. Par exemple, à la fin de l'année 1992 on a $t = 722$ jours et la vitesse de fluage calculée est de $0,16 \text{ mm/jour}$ c'est-à-dire $5mm$ par mois.

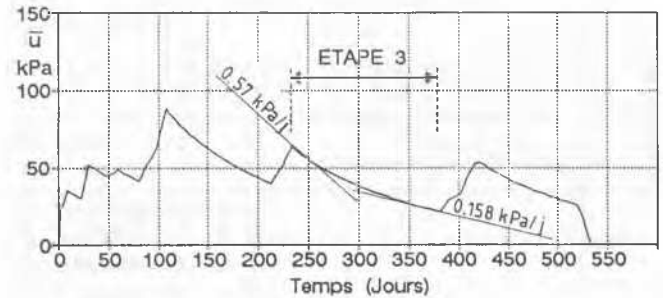


Fig 7. Histogramme de la pression interstitielle moyenne \bar{u}_w calculée.

Ces résultats ont justifié la décision de procéder à la quatrième étape de chargement avec extension stabilisatrice de 70m.

Les tassomètres profonds à bagues magnétiques ont été malheureusement mis hors d'usage au début de ce dernier remblaiement.

On peut néanmoins se reporter aux résultats des mesures inclinométriques (fig 4) pour vérifier l'effet de la quatrième étape de chargement sur la partie déviatorique du fluage :

- entre la deuxième étape de chargement et la fin de la troisième ($\Delta\sigma = 40 \text{ kPa}$), le déplacement latéral mesuré était maximal à 8m de profondeur et égal à 100mm, soit $2,5mm$ par kPa de contrainte moyenne due à la surcharge;
- entre la troisième étape et la fin de la quatrième étape ($\Delta\sigma = 55 \text{ kPa}$), ce déplacement est de 70mm, soit $1,27mm/kPa$ ce qui confirme l'effet stabilisateur de la banquette de 70m.

Conclusion

Un ensemble d'instrumentation comprenant une cellule de mesure de pression interstitielle, un tassomètre profond à bagues magnétiques et un inclinomètre, a fourni les données suffisantes à une analyse permettant de distinguer les tassements dus au fluage déviatorique et au fluage volumique, de ceux imputables à la consolidation proprement dite.

Les résultats de cette analyse ont éclairé les décisions concernant les dernières phases de préchargement.

Ils sont d'un intérêt plus général, car ils montrent qu'une instrumentation classique et bien au point peut permettre d'apprécier les parts relatives de la consolidation primaire et du fluage, et, par conséquent, d'approfondir l'interprétation des tassements et d'améliorer la prévision de leur évolution à long terme.