

Traitement d'une argile marine par consolidation atmosphérique

Treatment of soft marine clay by vacuum consolidation

P. Liausu & H. Scache

Ménard, Nozay, France

RÉSUMÉ

L'extension du port de Kwang Yang en Corée du Sud a nécessité la création d'une plate-forme gagnée sur la mer par remblaiement hydraulique de grands casiers en argile draguée sur 10 m de hauteur sur le fond marin lui-même constitué de 15 m d'argile marine. La solution de la consolidation atmosphérique a été retenue pour 2 tranches de travaux représentant 35 hectares de superficie. L'article présente le dimensionnement de la solution, la description de la réalisation des travaux, et le suivi des nombreuses mesures effectuées tout au long des travaux. Une comparaison entre les tassements prévisionnels et les tassements effectivement obtenus, généralement compris entre 4 et 5 m, est effectuée, permettant ainsi d'apporter une contribution à la compréhension du mécanisme de consolidation sous vide des sols argileux mous.

ABSTRACT

The expansion of Kwang Yang Port in South Korea required the construction of a huge platform gained from the sea by hydraulic reclamation of big compartments with dredged clay on 10 meters high on the original sea bed consisting also of 15 meters of soft marine clay. The vacuum consolidation solution has been retained for 2 phases of works, representing 35 hectares of surface. The paper presents the design of the solution, the description of the works and the analysis of a very comprehensive geotechnical monitoring carried out during the works.

A comparison between the predicted and the actual settlement, generally in the order of 4 to 5 meters, is made, allowing thus to bring a contribution to the understanding of the vacuum consolidation of soft clays mechanism.

Mots clés : argile molle, consolidation, vide, tassement, Asaoka, cohésion, pression interstitielle

1 INTRODUCTION

L'extension du terminal à conteneurs du port de Kwang Yang en Corée du Sud a été réalisée par la création d'un Polder (une avancée artificielle de terre gagnée sur la mer) avec digues et argiles issues d'un dragage effectué sur les 10 premiers mètres d'épaisseur sous le niveau du toit marin. Le sol en place étant constitué de 15 m d'argiles marines, l'épaisseur totale du sol en place à consolider avant de recevoir une surcharge d'exploitation de 5 t/m² était d'environ 25 m. La consolidation atmosphérique (cf. Fig. 1) a été réalisée sur 2 zones principales représentant au total environ 35 ha. Les travaux ont eu lieu entre 2003 et 2006. Cette technique est une alternative aux méthodes classiques de drains verticaux associés à un chargement statique. Un réseau de drains verticaux associés à des drains horizontaux est installé de manière à accélérer la vitesse de consolidation. Elle a permis un gain significatif de volume de remblai et de temps.



Figure 1: Mise en pompage d'une zone Vacuum

2 HYPOTHESES DE SOL ET METHODE DE DIMENSIONNEMENT

Les principales hypothèses géotechniques ont été résumées dans la figure 2. Des calculs théoriques ont été réalisés pour estimer le tassement absolu et le degré de consolidation. Les calculs théoriques prévoyaient une moyenne de 5.5 m de tassement absolu, correspondant approximativement à 20 – 25 % de l'épaisseur totale du sol compressible. De manière à atteindre le degré de consolidation optimal, le système de Vacuum et de préchargement a été mis en place. Une procédure de suivi et de contrôle réguliers a été installée et analysée au cours des différentes phases de consolidation. Des calculs utilisant les méthodes hyperboliques et d'Asaoka ont été réalisés sur des plaques de tassement pour estimer le tassement à l'infini, le degré de consolidation à un instant de date t et comparé aux calculs théoriques. Les corrections nécessaires ont été faites sur les calculs théoriques afin d'adapter la profondeur, les hypothèses géotechniques comme le facteur de consolidation horizontale ou l'indice de compression. La dernière page de ce document détaille l'analyse systématique d'une plaque de tassement.

Le système de consolidation atmosphérique n'a pas vraiment de limite concernant la profondeur de traitement. Aussi profond que les drains verticaux peuvent être efficaces, le système fonctionne. Ce système présente les avantages suivants :

- potentiel gain en épaisseur de surcharge (Le système de Vacuum est équivalent à une surcharge de 4 m d'épaisseur de matériau). La plupart des projets associent le Vacuum et la surcharge de remblai,
- amélioration de la stabilité au regard des risques de rupture circulaire sur des argiles de faible cohésion à court terme.

La pression appliquée par le système est isotrope sur l'ensemble de la « boîte »,

- augmentation de la vitesse de consolidation. Les périodes d'attente entre deux montées de remblais sont réduites dans le cas du Vacuum,
- augmentation du poids du remblai car le remblai n'est pas déjaugé. En effet, la présence de la membrane étanche permet de séparer l'eau de la nappe de l'eau présente dans la surcharge par la présence d'un vide. Le poids de l'eau est donc ajouté et non retiré. La nappe ici suit l'évolution du tassement et ne reste donc pas stable comme dans un cas classique de drains verticaux et surcharge sans rabattement de nappe.

Caractéristiques de sol	Symbole	Unité	Argile draguée		Argile naturelle	
Indice de compression	Cc	-	0.75	0.75	0.75	1.15
Coefficient de consolidation verticale	Cv	m²/s	4.00E-08	4.00E-08	3.00E-08	3.00E-08
Ration du coefficient radial de consolidation sur le vertical	Cr/Cv	-	1	1	1.5	1.5
Indice des vides	eo	-	2.37	2.37	2.27	2.33
Epaisseur	h	m	3.5	4	5	10
Indice de surconsolidation	OCR	-	0.8	0.4	1	1
Densité du matériau	γ	kN/m³	14.5	15	15	15

Figure 2: Paramètres de sol

L'objectif du système de Vacuum est de permettre l'obtention d'un degré de consolidation suffisant de manière à pré-vieillir le sol et le rendre suffisamment bon pour réduire les risques de déformation sous charge d'exploitation. La méthode de Buismann (Fig. 3) est utilisée pour le dimensionnement. Les spécifications dépendent des exigences du projet ou des conditions particulières de sol (des sols à forte teneur en matériaux organiques causeront plus de tassement secondaire par exemple). Les calculs de tassement primaire utilisent les formules classiques de Barron, Hansbo ou Yoshikuni.

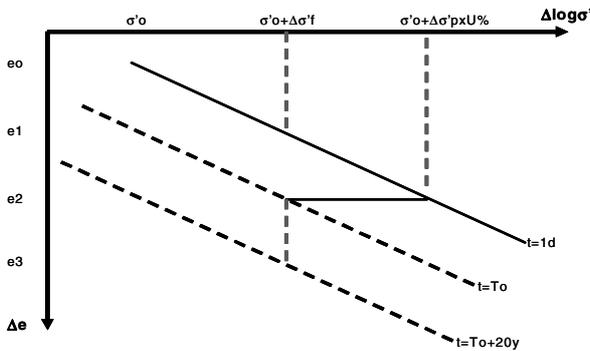


Figure 3: Méthode de Buismann

La figure 4 montre un graphique de tassement provenant d'une plaque de tassement sensiblement similaire aux prévisions théoriques. Le dimensionnement théorique doit parfois être adapté de manière à retrouver le comportement des données in-situ. Dès que le degré de consolidation est achevé, les pompes sont coupées et la surcharge retirée jusqu'à se trouver à la côte finie du projet. La période de consolidation sous Vacuum a une durée typique comprise entre 4 et 12 mois, dépendant du planning du Maître d'Ouvrage, de la maille des drains verticaux et de la perméabilité du sol traité.

Un des points clés conditionnant directement l'efficacité de la méthode est de s'assurer d'une bonne étanchéité de la boîte maintenue sous vide.

La première difficulté se pose lorsque le substratum est perméable, ce qui était ici le cas (roches altérées). Il faut en effet impérativement stopper les drains avant d'obtenir l'ancrage dans ce substratum pour éviter de trop importantes venues d'eau. Des tests de pénétration à blanc sont donc réalisés pour avoir une bonne cartographie de la profondeur du substratum, à raison d'un test tous les 400 m², complétés par des CPT (Cone Penetration Test).

La deuxième difficulté à surmonter est celle de l'étanchéité périphérique, lorsque des horizons perméables sont rencontrés dans les couches supérieures. Dans le cas présent, il a fallu avoir recours à la réalisation d'une paroi Sol Ciment Bentonite.

Enfin, pour relier la membrane horizontale en PEHD au mur ainsi créé, une membrane verticale est ancrée et soudée à la membrane horizontale.

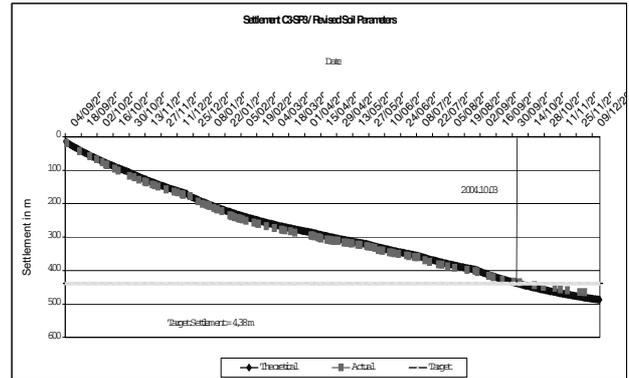


Figure 4: Comparaison tassement théorique et mesuré

3 MISE EN PLACE IN – SITU DE LA TECHNIQUE MENARD – VACUUM

Comme indiqué ci dessus, une des étapes importantes du traitement a été celle de la réalisation de l'étanchéité périphérique.

Des CPT ont été préalablement réalisés à 20 m de profondeur sur tout le pourtour de la zone à traiter, afin de vérifier l'épaisseur et la profondeur des couches perméables issues du dragage (figure 6). Ces résultats ont conduit à réaliser une paroi en sol ciment bentonite, dont la profondeur a atteint 15 m, de façon à obtenir un écran de perméabilité inférieure à 10⁻⁷ m/s.

Un mât équipé avec un système de mixage est installé sur une pelle de 70 t. Le système de mixage est constitué de 3 tarières creuses (Figure 5) de 600 mm de diamètre. Le coulis ciment/bentonite est pompé depuis la station dans les deux tarières latérales. De l'air était injecté sous pression dans la tarière centrale pour aider à la pénétration dans les sols compacts de la plate-forme.



Figure 5: Outil de réalisation de l'écran

Lorsque la profondeur du mur Sol/Bentonite/Ciment ne dépassait pas 3 m, une tranchée réalisée à la pelle rétro a été préférée au système des trois tarières.

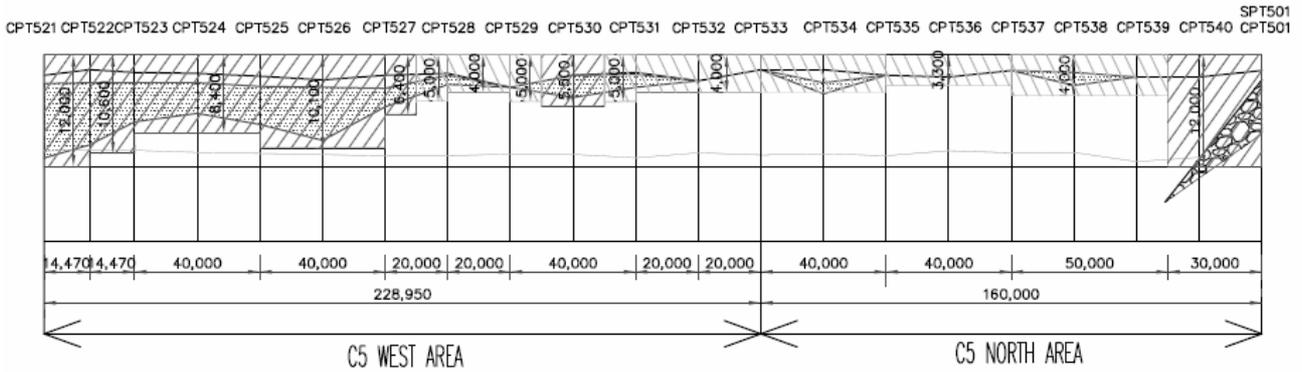


Figure 6: Coupe longitudinale de l'écran étanche périphérique

Différents tests ont été effectués sur ce mur, comme des tests de continuité, de perméabilité ou de résistance en compression pour vérifier son intégrité avant mise en place de la membrane verticale.



Figure 7: Installation de la membrane verticale

Après installation de ce mur, la membrane verticale (Figure 7) a été installée et soudée avec la membrane horizontale d'une épaisseur de 1 à 1.5 mm afin d'assurer l'étanchéité de ce système. Un géotextile est installé avant la mise en place de ce système afin de limiter au maximum les effets points durs risquant de faire poinçonner la membrane et de réduire son imperméabilité à l'air. La soudure de la membrane est réalisée par l'appareil présenté figure 8.

Les CPV (Capteur de Pression Vacuum) ont été installés sous la membrane suivant à raison d' 1 pour 1 500 m² afin de vérifier l'évolution de la dépression sous opération.

Une dépression de 70 KPa (équivalent à 4 m de remblai) est atteinte après 10 jours de pompage environ. Les CPV sont connectés aux manomètres (figure 8) et vérifiés plusieurs fois par jour afin de pouvoir suivre l'évolution du tassement en fonction de la dépression (figure 9).



Figure 8: Lecture des manomètres

Les plaques de tassement, les tassomètres multipoints et les piezomètres ont été installés dans chaque zone de manière à obtenir les données brutes qui seront analysées et comparées aux estimations théoriques. Les résultats permettent de définir le degré de consolidation devant être atteint pour libérer les zones au Génie Civil. La page suivante analyse une plaque de tassement par différentes méthodes de calcul du degré de consolidation.

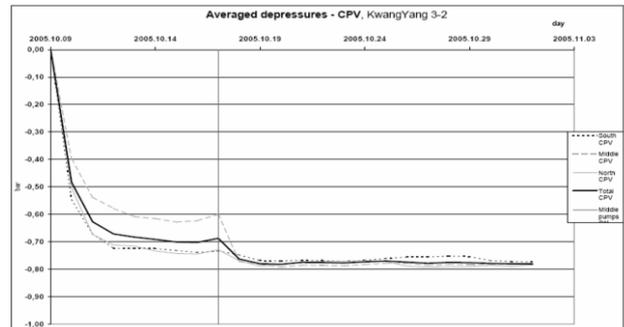


Figure 9: Evolution de la dépression dans le temps

4 SUIVI GEOTECHNIQUE ET DETERMINATION DU DEGRE DE CONSOLIDATION :

L'analyse suivante a été faite sur une plaque de tassement représentative. La hauteur de remblai et le tassement in-situ sont régulièrement enregistrés. La méthode d'Asaoka est utilisée pour calculer le tassement à l'infini et le degré de consolidation à l'instant de la dernière valeur mesurée (figure 10).

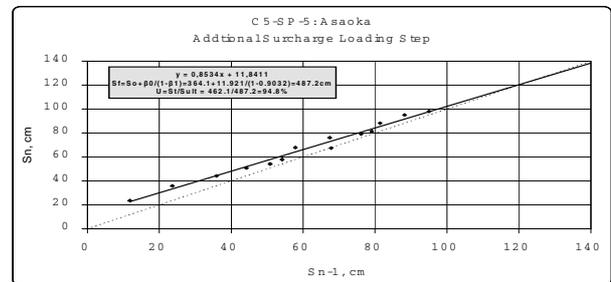


Figure 10: méthode d'Asaoka (tassements en cm)

Une deuxième méthode de calcul est présentée ci-dessous, la méthode hyperbolique. Considérons un tassement S_0 à un temps t_0 . De la même manière que pour Asaoka, il est possible de tracer une droite après un degré de consolidation d'au moins

60% à surcharge constante représentée en ordonnée par $\frac{t - t_0}{S_t - S_0}$ et en abscisse par $t - t_0$. La droite a pour équation: $y = a.x + b$, avec :

$$\frac{t - t_0}{S_t - S_0} = a.(t - t_0) + b$$

Equivalent à

$$S_t = S_0 + \frac{1}{a + \frac{b}{t - t_0}}$$

et le tassement à l'infini se déduit comme suit en prenant t tendant vers l'infini : $S_\infty = \lim_{t \rightarrow \infty} S_t = S_0 + \frac{1}{a}$.

L'analyse de nombreuses plaques de tassement a montré que cette méthode hyperbolique était globalement plus sécuritaire quant à l'approche de calcul du degré de consolidation. Un exemple type de plaque de tassement (figure 11), la plaque C5-SP5 confirme l'influence de la surcharge et du Vacuum sur les tassements in-situ. La ligne rouge indique le démarrage du pompage suivi par une cassure dans la pente du tassement.

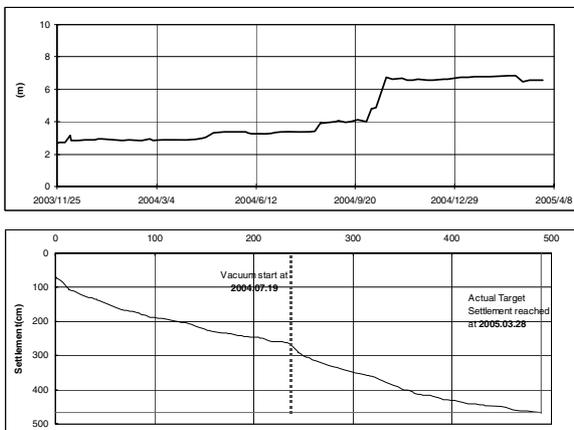


Figure 11: Analyse d'une plaque (partie haute : hauteur de remblai en m - partie basse : tassement en cm avec tassement cible)

Le calcul théorique, recalibré en fonction des valeurs in-situ, nous permet de prévoir l'arrêt du pompage et le retrait de surcharge. Le degré de consolidation est calculé par les deux méthodes exposées ci-dessus. Le critère alors atteint sur les plaques représentatives, des tests in - situ comme par exemple des scissomètres sont réalisés. Ces scissomètres permettent de vérifier l'évolution du C_u (courbe en bleu avant et courbes en rouge et vert après consolidation, valeurs en t/m^2).

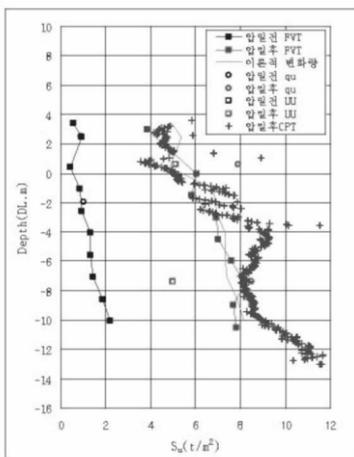


Figure 12: Evolution de C_u en fonction de la profondeur

Il est alors possible de déterminer par une autre méthode le degré de consolidation grâce à l'équation suivante :

$$C_i = C_{i-1} + \lambda_{cu} \times \Delta P_i \times U_i$$

avec: C_i = cohésion à l'étape i
 C_{i-1} = cohésion à l'étape $i-1$
 λ_{cu} : $C_u/\sigma'v =$ augmentation de la cohésion en fonction de la contrainte effective
 ΔP_i = variation de contrainte entre l'étape $i-1$ et i
 U_i = degré de consolidation atteint à la fin de l'étape i

La figure 12 met en évidence l'augmentation du C_u après consolidation sur un des profils scissométriques de mesure. Cette augmentation a en général dépassé $5t/m^2$. Ces résultats ont été utilisés pour les calculs de stabilité.

Une autre particularité du système de Vacuum est d'induire une cohésion apparente dans le remblai granulaire de surface maintenu sous vide ; en effet, dans le plan de Mohr-Coulomb, du fait de l'augmentation des contraintes effectives σ'_v et σ'_h , tous les cercles de Mohr se trouvent déplacés vers la droite d'une valeur égale à la dépression, soit environ 70 kPa. Tout se passe donc comme si la courbe intrinsèque était décalée vers la gauche de 70KPa et donc comme si le sol avait une cohésion apparente $c = \sigma \tan \Phi$

où σ et la dépression fixée à $\sigma = 70$ kPa.

Ce qui conduit, pour un angle de frottement de 33° du remblai à donner une cohésion de 45 kPa à ce remblai.

Une dernière méthode permet de vérifier le degré de consolidation en utilisant les piezomètres. Dans le graphique 13 ci-dessous, l'évolution de la pression interstitielle en fonction de la montée de remblai et de la mise en route du Vacuum est présentée.

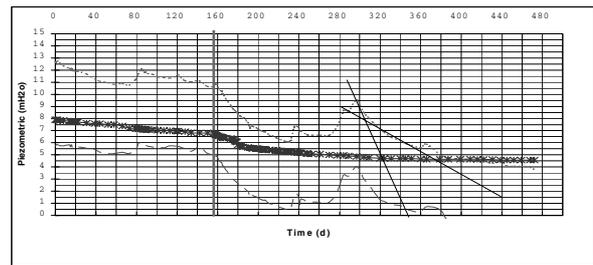


Figure 13: Evolution de la pression interstitielle dans le temps

La pente correspondant à la diminution de pression interstitielle permet de calculer le degré de consolidation. Dans ce cas, $U(\%)$ n'est pas directement mesuré. Un tel graphique permet de recalculer avec une bonne approximation le coefficient de consolidation radial C_r qui est réinjecté dans le calcul et le degré de consolidation théorique revu si nécessaire.

5 CONCLUSION

Grâce à un dimensionnement et un suivi géotechnique adaptés, présentés dans cette communication, l'application de la consolidation atmosphérique sur le chantier de Kwang Yang a permis de traiter avec succès environ 7 millions de mètres cubes d'argiles marines très molles.

REFERENCES

Cogon J.M., 1991. La consolidation atmosphérique, Revue Française de Géotechnique n°57, pp 37-47
 Liausu Ph., Massé F., 2002. Successful application of Menard Vacuum Consolidation method to Nakdong River soft clay in Kimhae South Korea, 8° Congresso Nacional de Geotecnia - Lisboa Portugal - pp 895-906 .