

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.

Digues Construites sur Argile Marine à Singapour

Dykes on Marine Clay in Singapore

JP. BADIOU and
 JC. NADAUD Renardet Engineering,
 J. FLORENTIN,
 JM. DUPAS,
 P. FLORENTIN and
 A. PECKER Mécasol, Paris, France

RESUME

La constitution de réservoirs d'eau à Singapour nécessite la construction de digues en terre reposant sur une couche d'argile marine de caractéristiques mécaniques faibles. Deux types de solutions ont été réalisées : digue "flottante" et digue par poinçonnement. Dans les deux cas, un remblai expérimental en vraie grandeur a été mis en place préalablement à l'exécution des digues.

Pour la digue flottante, les résultats déduits de l'observation du remblai expérimental et les différentes phases de construction de la digue sont présentés.

Pour la digue par poinçonnement, le mode de réalisation est présenté, ainsi que la justification théorique et expérimentale de la hauteur de remblai nécessaire pour provoquer le poinçonnement et de l'épaisseur résiduelle d'argile marine restant sous la digue après poinçonnement.

1 - LE SOL : RECONNAISSANCE ET ESSAIS DE LABORATOIRE

Le substratum est constitué de séries sédimentaires permotriassiques de grès et marnes compactes rougeâtres, jaunâtres ou grisâtres, altérées sur une épaisseur importante par kaolinisation et latéritisation.

Les dépôts marins récents, dont l'épaisseur peut atteindre 20 m, sont constitués d'argile marine gris bleuté et, en surface, de matériaux organiques bruns. Leurs caractéristiques moyennes, déterminées au laboratoire, sont les suivantes : teneur en eau naturelle $w = 90\%$, densité sèche $\gamma_d = 8 \text{ kN/m}^3$, densité humide $\gamma = 15 \text{ kN/m}^3$, poids spécifique des grains $\gamma_s = 26.5 \text{ kN/m}^3$. Les limites d'Atterberg correspondent à des argiles très plastiques (limite de liquidité $LL = 95\%$, indice de plasticité $IP = 60\%$). Les dépôts marins sont normalement consolidés et très compressibles (indice de compression $C_c = 0.8$, coefficient de consolidation $C_v = 1 \text{ à } 3 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$): La résistance au cisaillement, mesurée in-situ au scissomètre, augmente avec la profondeur (gradient de cohésion $q_0 = 2 \text{ à } 2.5 \text{ kN/m}^3$). La cohésion en surface peut, par suite d'une dessiccation du matériau, être plus forte que celle déduite des mesures scissométriques en profondeur ($C_0 = 1 \text{ à } 3 \text{ kN/m}^2$). La sensibilité au remaniement est élevée ($St = 3 \text{ à } 4$).

2 - LA DIGUE DE PANDAN : CONSTRUCTION PHASE PAR PHASE D'UNE DIGUE "FLOTTANTE"

La digue du réservoir de Pandan (10^6 m^2 de superficie) au sud-ouest de Singapour, longue de 6 200 m, est construite hors d'eau par phases successives, sans poinçonner la couche d'argile marine d'une épaisseur maximale de 20 m.

2.1 - Avant-projet

L'avant-projet prévoyait une digue de 4.50 m au-dessus du terrain naturel, dont le tassement au cours des 3 premières années serait de 1 à 1.50 m. La construction progressive par couches horizontales serait faite en deux ans, la consolidation de l'argile marine étant accélérée par des drains de sable verticaux.

Le coût estimé est de $4 \cdot 10^6$ US \$ (dont $1.5 \cdot 10^6$ US \$ pour les drains de sable) pour une capacité de stockage utile de $3.6 \cdot 10^6 \text{ m}^3$.

2.2 - Remblai expérimental

Un an avant le début des travaux, un remblai expérimental fut mis en place, afin de déterminer l'influence réelle des drains de sable sur la consolidation et l'augmentation de la cohésion au cours de la construction.

Le remblai expérimental, long de 80 m, large de 36 m et haut de 3.80 m, repose sur 12 m de dépôts marins. Le matériau utilisé est une argile silteuse provenant de l'altération du permotrias, placé sur une première couche de sable de 0.30 m d'épaisseur. Le remblai fut construit en trois phases, entre février et mai 1971, et des drains de sable verticaux, de 12 m de long, de 0.12 m de diamètre et espacés de 2.70 m, furent mis en place sous le tapis drainant sur un tiers de la surface totale. La figure 1 indique les hauteurs successives du remblai (1 m, 2 m et 3.80 m), les variations des repères de tassement et de la pression des pores (piézomètres, cellules Glotzl P4 K).

Après 400 jours d'observations, les principaux résultats sont les suivants :

- Le tassement mesuré (1.04 m) n'est que légèrement supérieur au tassement calculé (0.91 m) à partir des essais de laboratoire.

- Les degrés de consolidation prévus et mesurés 120 jours après le début de construction sont les suivants :

| | sans drains de sable | avec drains de sable |
|--|----------------------|----------------------|
| Analyse théorique | 10 % | 50 % |
| D'après les cellules de pression des pores | 41 % | 44 % |
| D'après les repères de tassement | 55 % | 58 % |

Il en résulte que les drains de sable apparaissent inefficaces, l'existence de chemins naturels de drainage (racines, fines couches sableuses) favorisant un drainage latéral. Leur utilisation n'a pas été retenue dans le projet final.

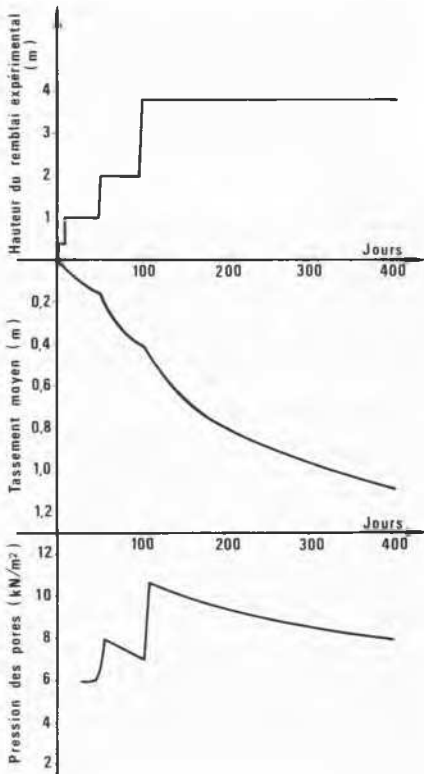


Fig.1 : Digue de Pandan. Remblai expérimental
Mesures de tassement et de pression des pores

- La différence entre les degrés de consolidation déduits des repères de tassement et des cellules de pression des pores peut être due à la présence d'une phase gazeuse dans les matériaux organiques. La dissolution du gaz dans l'eau interstitielle sous l'effet de la mise en charge crée un tassement instantané échappant aux mesures des cellules.

- Les essais scissométriques effectués un an après la construction montrent une augmentation importante de la cohésion, passant de 10 à 30 kN/m² en moyenne.

2.3 - Construction de la digue

- Phase 1 (février 1972 à mars 1972)

Après la fermeture des communications avec la mer et l'assèchement de la zone par pompages, la végétation (palétuviers) est décapée par des équipements légers sur une bande de terrain de 65 m de large dans l'emprise de la digue.

- Phase 2 (mars 1972 à mai 1972)

Une première couche de 0.70 m à 1 m d'épaisseur - valeur minimale nécessaire pour supporter la circulation des engins - est mise en place sur une largeur de 65 m, à une cadence de 100 000 m³ par mois.

Le matériau de remblai - argile silteuse et sableuse d'altération du substratum - est identique à celui du remblai expérimental. Le simple compactage par la circulation des engins produit une densité sèche de l'ordre de 95 % de la densité maximale de l'essai Proctor normal. Des plaques pour les mesures de tassement sont mises en place tous les 50 m sur cette première couche.

- Phase 3 (mai 1972 à juin 1972)

Une deuxième couche de 1 m d'épaisseur est mise en place sur toute la largeur de l'ouvrage, à une cadence de 120 000 m³ par mois. Le tassement moyen mesuré est de 0.25 m.

- Phase 4 (juillet 1972 à août 1972)

Une troisième couche de 0.60 m d'épaisseur est mise en place en juillet 1972, et le remblai est désormais suffisamment épais et stable pour permettre le compactage par des rouleaux à pneus. La densité en place est égale à la densité maximale de l'essai Proctor normal. Fin août 1972, 600 000 m³ sont en place, et la hauteur de la digue atteint 3.30 m. Le tassement moyen mesuré est de 0.35 m, et aucune fissuration n'apparaît.

- Phase 5 (septembre 1972 à décembre 1972)

Le corps de la digue est construit, avec une cadence moins rapide, jusqu'à une hauteur de 4.50 m. Le tassement moyen mesuré est de 0.80 m. Quelques fissures longitudinales sans mouvements importants apparaissent en crête sur 10 % de la longueur totale. Seule une zone de 300 m de long, située sur une épaisseur de 16 m d'argile marine, est le siège d'un glissement circulaire complet. L'analyse de ce glissement fait toutefois apparaître une augmentation de la cohésion depuis le début de la construction, passant de 10 à 20 kN/m².

- Phase 6 (janvier 1973 à mars 1973)

La majeure partie de la risberme côté réservoir est rechargée (environ 160 000 m³ de terre) jusqu'à une hauteur de 3.50 m, pour consolider l'argile marine sous-jacente et augmenter la longueur d'une ligne de rupture potentielle. Dans le même temps, cinq zones expérimentales furent choisies pour réaliser des ruptures en vraie grandeur par augmentation progressive de la hauteur de remblai. Cette rupture intervint pour une hauteur de remblai de 6 à 7 m, correspondant, pour un coefficient de sécurité de 1, à une cohésion de 30 à 40 kN/m². En conséquence, la hauteur finale en crête pouvait être portée de 4.50 m à 6.50 m.

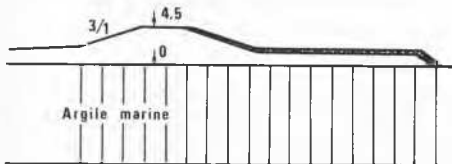
- Phase 7 (juillet 1973 à décembre 1973)

Le matériau mis en place pour précharger la risberme est repris pour surélever la crête de digue. Les terrassements sont achevés fin décembre 1973. Le tassement moyen mesuré est de 1.50 m, et aucune fissuration n'apparaît.

- Phase 8 (septembre 1974 à décembre 1974)

La digue est nivelée définitivement pour compenser les tassements. La surface côté réservoir est protégée par un rip-rap. A la réception définitive en décembre 1974, le tassement moyen mesuré est de 1.70 m.

- Avant projet (mars 1971)
- Suppression des drains de sable (juin 1971)
- Construction (février - décembre 1972)



- Préchargement côté réservoir (janvier - juin 1973)



- Projet final (juin 1973)
- Construction (juillet 1973 - décembre 1974)

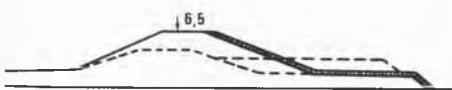


Fig. 2 : Digue de Pandan
Evolution du projet de construction

- Phase 9 (janvier 1975 à juin 1976)

Le réservoir est rempli par pompage. En juin 1976, le niveau d'eau atteint sa cote finale (6 m), et le tassement mesuré est de 1.80 m. Aucun désordre n'est signalé sauf quelques fissures de retrait superficielles.

Le coût final de la construction est de 2.6. 10⁶ US \$, pour une capacité de stockage utile de 5.1. 10⁶ m³. L'observation du comportement des ouvrages a permis une surélévation de la digue par rapport au projet initial et une réduction importante du coût au m³ stocké.

Les 3 principales étapes de l'évolution du projet sont schématisées sur la figure 2.

3 - LA DIGUE DE POYAN : CONSTRUCTION PAR POINÇONNEMENT

La digue côtière de Poyan, à l'ouest de Singapour, longue de 1300 m, haute de 7 m dont 4 m hors d'eau, est construite en poinçonnant sous l'eau la couche d'argile marine d'une épaisseur maximale de 15 m.

3.1 - Mode de construction

Une solution par digue flottante n'a pas été retenue à cause des difficultés de mise en place sous la mer des premières couches de remblai et de la cohésion en surface de l'argile marine, plus faible qu'à Pandan et pouvant entraîner localement des ruptures importantes.

Sans aller jusqu'à une substitution totale, une construction par poinçonnement permet de réduire fortement l'épaisseur d'argile marine sous la digue et les tassements de la fondation. Le remblai est construit à l'avancement et, une fois le poinçonnement obtenu, la cote de la crête est maintenue constante pour profiter de la diminution de la résistance au cisaillement due à la sensibilité de l'argile. Le poinçonnement est freiné par la formation de bourrelets, latéralement et frontalement.

3.2 - Etude théorique

On détermine la hauteur théorique de remblai provoquant le poinçonnement de l'argile marine en se référant à la résistance au poinçonnement d'une couche purement cohérente (cohésion C_u) d'épaisseur limitée (D).

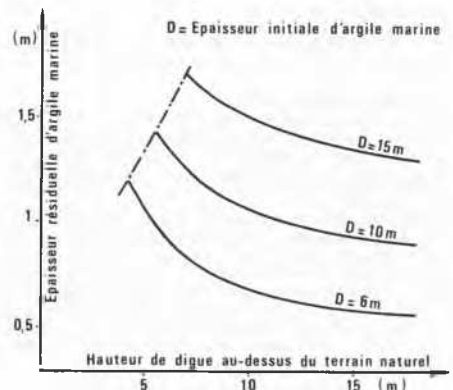


Fig.3 : Digue de Poyan. Epaisseur résiduelle d'argile marine (sensibilité $S_t = 3.5$)

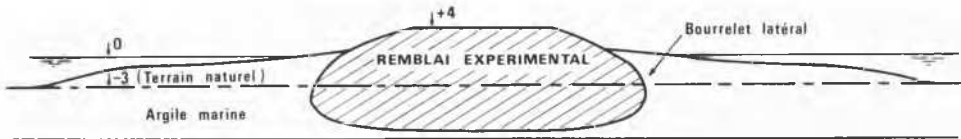


Fig.4 : Digue de Poyan. Remblai expérimental après poinçonnement

Pour une largeur (B) à la base de la digue et un contact rugueux, la résistance au poinçonnement est :

$$q_U = N C_U = (4.1 + 0.5 B/D) C_U \quad \text{pour } B > 2 D$$

$$\text{et } q_U = N C_U = (\pi + 2) C_U \quad \text{pour } B < 2 D$$

La cohésion prise en compte est une valeur moyenne sur la couche $C_U = C_0 + 0.5 G_0 D$.

On détermine, pour chaque valeur de l'épaisseur initiale (D) de la couche d'argile marine, l'épaisseur résiduelle (H) après poinçonnement en fonction de la hauteur du remblai (Z). On suppose que les bourrelets latéraux ne dépassent pas 3 m de haut, ce qui correspond à la hauteur immergée de la digue. On suppose également que la digue s'enfonce par poinçonnement en conservant une largeur constante (B). Quand l'équilibre est atteint, la pression nette appliquée, en tenant compte de la surcharge latérale due aux bourrelets, est égale à la résistance au poinçonnement de l'argile marine remaniée restant sous la digue :

$$q_U = N C_U / S_t = (4.1 + 0.5 B/H) [C_0 + 0.5 G_0 (D - 0.5 H)] / S_t$$

A largeur en crête constante, l'épaisseur résiduelle diminue quand la hauteur de remblai augmente, malgré l'augmentation de la largeur à la base de la digue et donc de la résistance au poinçonnement.

Les résultats présentés sur la figure 3 montrent que cette diminution est importante pour une hauteur de remblai supérieure de quelques mètres à la hauteur provoquant le poinçonnement et que l'épaisseur résiduelle qui serait atteinte asymptotiquement pour une hauteur de remblai infinie, correspond à environ 7 % de l'épaisseur initiale.

L'épaisseur résiduelle est d'autant plus faible que la sensibilité de l'argile est grande.

3.3 - Remblai expérimental

Un remblai expérimental fut mis en place afin de vérifier le principe d'application de la méthode et de confirmer la théorie en mesurant l'épaisseur résiduelle après le poinçonnement et l'extension des bourrelets latéraux.

Le remblai expérimental, long de 200 m, fut construit de septembre à novembre 1974. Pour une hauteur de 7 m au-dessus du terrain naturel (soit 4 m hors d'eau), la couche d'argile marine, de 3.50 à 11 m d'épaisseur initiale, est poinçonnée, et l'épaisseur résiduelle varie de 0.90 m à 1.50 m. Les bourrelets latéraux, larges de 20 à 30 m, s'élevèrent de 3 m au-dessus du terrain naturel, soit jusqu'au niveau moyen de la mer.

Le remblai après poinçonnement est représenté sur la figure 4. Le volume de matériau mis en œuvre (80 000 m³) confirme l'hypothèse d'un enfoncement de la digue à largeur constante.

Les épaisseurs résiduelles mesurées par sondage en différents profils permettent de confirmer les valeurs de la cohésion et la forte sensibilité ($S_t = 3.5$) de l'argile marine prise en compte dans les calculs théoriques.

Après 6 mois de chargement, la cohésion de l'argile marine résiduelle n'est que $C_U = 30$ kN/m², à cause de la diminution de la résistance au cisaillement due au remaniement provoqué par le poinçonnement.

3.4 - Projet final

Le mode de construction de la digue par poinçonnement de l'argile marine a été retenu pour le projet final.

Pour une hauteur de digue de 7 m au-dessus du terrain naturel, l'épaisseur résiduelle d'argile marine ne devrait pas dépasser 1.50 m à 1.70 m pour une épaisseur initiale maximale de 15 m. Le tassement de consolidation serait de 0.15 à 0.25 m (0.20 m pour une épaisseur initiale de 11 m) et sera acquis presque en totalité dans l'année suivant la construction. La résistance au cisaillement non drainé augmentera au cours de la consolidation et atteindra au moins 60 kN/m² après un an.

4 - CONCLUSION

Deux modes de construction (digue flottante et digue par poinçonnement) ont été employés pour la réalisation de digues sur une épaisse couche d'argile marine de caractéristiques mécaniques faibles.

La digue flottante nécessite une construction progressive (30 mois environ) par couches successives avec des délais de consolidation importants. Une mise en place trop rapide du remblai peut provoquer un remaniement de l'argile marine très sensible, et entraîner la rupture, et ce mode de construction est d'une application difficile lorsque le terrain naturel est sous l'eau. Des glissements limités peuvent se produire et être réparés assez facilement. Le tassement de consolidation est important (1.80 m) mais est acquis pour l'essentiel en cours de construction. L'étude d'un remblai expérimental a permis de supprimer du projet final l'utilisation de drains de sable verticaux.

La digue par poinçonnement nécessite une construction à l'avancement avec, en tête du remblai, une quantité de matériau suffisante pour maintenir constante la hauteur de digue en cours de poinçonnement. On profite ainsi de la sensibilité au remaniement de l'argile marine pour réduire l'épaisseur résiduelle d'argile après poinçonnement. Le tassement de consolidation est réduit (0.20 m). L'étude d'un remblai expérimental a permis de confirmer l'étude théorique et de vérifier le principe d'application de la solution par poinçonnement.