

# UN NOUVEAU SYSTEME NOVATEUR DE CONSOLIDATION BASE SUR LE CONCEPT EPROUVE DE LA CONSOLIDATION ATMOSPHERIQUE

A.H. Nooy van der Kolff, S.E.J. Spierenburg & F.A.J.M. Mathijssen  
Royal Boskalis Westminster nv, Papendrecht, Pays-Bas  
[A.H.NooyvanderKolff@boskalis.nl](mailto:A.H.NooyvanderKolff@boskalis.nl), [S.E.J.Spierenburg@boskalis.nl](mailto:S.E.J.Spierenburg@boskalis.nl) &  
[F.A.J.M.Mathijssen@boskalis.nl](mailto:F.A.J.M.Mathijssen@boskalis.nl)

## RESUME

Bon nombre des grandes villes du monde se situent dans des plaines côtières ou des zones d'embouchure, près de rivières et autres voies navigables. Bien que ces situations puissent être favorables d'un point de vue économique, elles sont souvent tributaires de piètres conditions des sous-sols. Les sédiments à grains fins fortement compressibles comme l'argile, le limon et la tourbe présentent généralement de faibles résistances au cisaillement et donnent lieu à des problèmes de stabilité et de tassement lorsqu'ils soutiennent des infrastructures comme les routes, les voies ferroviaires, les digues, les remblais, etc.

Aujourd'hui, les incitants économiques appuient des tendances comme la réduction de la période de rendement du capital investi et, partant, du temps de construction. Mais ils encouragent aussi des exigences de construction qui paraissent incompatibles en réduisant la maintenance au cours de la durée de vie opérationnelle des infrastructures. De plus, le public est de plus en plus conscient de son environnement qui ne cesse de s'encombrer et pousse à réduire les risques de construction.

Ces évolutions combinées au déplacement des responsabilités découlant de nouvelles formes contractuelles (par ex. clé en main, etc.) ont stimulé le développement de nouvelles techniques destinées soit à accélérer le processus de consolidation ou à diminuer les tassements absolus dans les sols compressibles sans courir le risque de voir apparaître des défauts ou de devoir recourir à une maintenance à long terme.

Les systèmes destinés à accélérer le processus de consolidation sont tous fondés sur deux principes :

- La diminution de la longueur du chemin de drainage de l'eau interstitielle et/ou l'application d'une surcharge. La surcharge est généralement composée de sable mais peut également prendre la forme de la pression atmosphérique résultant de la consolidation par le vide.
- La réduction ou l'élimination du tassement est généralement obtenue soit en diminuant la compressibilité des strates cohésives en appliquant des liants dans le sol (stabilisation en bloc) ou en concentrant les efforts sur des éléments fermes comme des pieux ou des colonnes qui transféreront ces charges dans les strates sous-jacentes plus aptes à ce propos.

Certaines techniques combinent l'accélération de la consolidation à l'utilisation d'éléments fermes. Généralement les techniques qui réduisent ou éliminent les tassements seront onéreuses en comparaison à celles qui accélèrent la consolidation.

Ce document se concentrera sur un nouveau système, appelé BeauDrain, qui combine la technique éprouvée du drainage horizontal et vertical et la consolidation atmosphérique à l'aide d'une procédure d'installation novatrice. Les principes mécaniques du sol, ce système lui-même, la conception et le contrôle ainsi que les résultats du site test, connu sous le nom de Zevenhuizen, seront abordés. Enfin, les performances du système BeauDrain au cours de la construction de la RW 11, une autoroute entre Alphen a/d Rijn et Bodegraven aux Pays-Bas, seront passées en revue en présentant et en interprétant les données de contrôle.

## MOTS CLES

CONSOLIDATION ATMOSPHERIQUE / TECHNIQUES D'AMELIORATION DU SOL /  
REDUCTION DES RISQUES.

## 1. CONCEPTION D'UN REMBLAI

La conception d'un remblai sur des sols mous et compressibles doit généralement satisfaire à des critères comme :

- Les critères fonctionnels spécifiés en termes de tassement (tassements à long terme, tassement différentiels) ;
- Les critères de stabilité pendant et après la construction, généralement exprimés en terme de coefficients minimum de sécurité ;
- Une période de construction limitée.

Les tassements comprennent les tassements primaires et secondaires. Les tassements primaires sont contrôlés par consolidation. Les tassements post-construction peuvent être réduits en surchargeant et en accélérant le processus de consolidation au cours de la construction.

La stabilité est liée aux propriétés de résistance au cisaillement in situ du sol et au degré de consolidation obtenu après application de la charge.

Partant, la conception d'un remblai spécifiera une surcharge et un taux de charge. De plus, afin d'assurer une stabilité, il sera nécessaire de faire correspondre le taux de charge et le taux de consolidation en installant un système de drainage approprié.

Le degré de consolidation en fonction du temps peut s'exprimer comme suit :

$$U = \sqrt[6]{\frac{T_v^3}{T_v^3 + 0.5}} \quad (1)$$

Où :  $U$  = degré de consolidation [-]  
 $T_v$  = facteur de durée de consolidation [-]

L'équation (2) démontre l'influence de la longueur du chemin de drainage sur le coefficient temps vertical et, partant, sur la période de consolidation. La réduction de la longueur du chemin de drainage, généralement égale à l'épaisseur (ou  $\frac{1}{2} H$  dans le cas d'un drainage à deux côtés), peut être obtenue en installant des drains verticaux ou d'autres éléments de drainage.

$$T_v = \frac{c_v \cdot t}{H^2} \quad (2)$$

Où :  $c_v$  = coefficient de consolidation verticale [ $m^2/s$ ]  
 $H$  = longueur du chemin de drainage de l'eau interstitielle [m]  
 $t$  = temps de consolidation [s]

Il ressort de la formule précédente que l'application d'une surcharge n'accélère pas le processus de consolidation, mais donne lieu à un tassement plus prononcé au cours de la même période de consolidation. Ceci implique que l'affaissement demandé peut être obtenu sur une période plus courte, au terme de laquelle la surcharge doit être enlevée pour éviter un tassement plus prononcé que strictement nécessaire. Schéma 1 montre la courbe temps/tassement d'une consolidation normale, d'une consolidation par des drains verticaux uniquement (réduction de la longueur du chemin de drainage) et d'une surcharge combinée à des drains verticaux.

Selon Mesri (1975), la résistance au cisaillement sans drain est fonction de la contrainte effective comme suit :

$$s_u = f * (s' + U \cdot \Delta s) \quad (3)$$

Où :

- $s_u$  = résistance au cisaillement sans drain [kPa]
- $s'$  = contrainte effective [kPa]
- $\Delta s$  = augmentation de la contrainte totale [kPa]
- $f$  = coefficient égal à 0,22

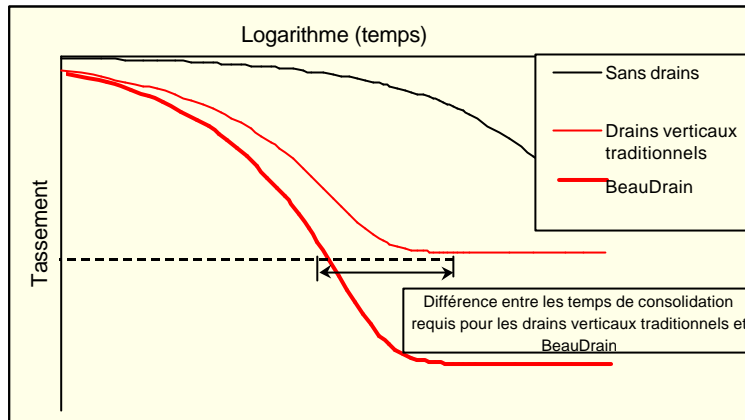


Schéma 1 – Périodes de consolidation par diverses méthodes

En termes de contrainte effective, la même relation peut être exprimée comme suit :

$$\tau = c' + (\sigma'_{init} + U \cdot \Delta \sigma) \cdot \tan \phi' \quad (4)$$

Où :

- $\tau$  = résistance au cisaillement [kPa]
- $c'$  = cohésion [kPa]
- $\phi'$  = angle de frottement [°]

## 2. CONSOLIDATION ATMOSPHERIQUE

Sous sa forme la plus simple, la méthode de la consolidation atmosphérique comprend un système de drains verticaux et une couche de drainage (généralement du sable) au sommet, étanche à l'atmosphère grâce à une géomembrane placée à la surface. Des drains horizontaux installés dans la couche de drainage et connectés à des pompes en combinaison avec des drains verticaux enlèvent l'eau interstitielle des strates compressibles et réduisent la pression atmosphérique dans ces couches.

L'augmentation de la contrainte effective pour une surcharge conventionnelle au temps  $t_1$  peut être formulée selon l'équation (5). Lors de la combinaison de la même surcharge avec une consolidation atmosphérique, l'augmentation de la contrainte effective peut être calculée en utilisant l'équation (6).

$$\Delta \sigma'(t_1) = U(t_1) \cdot \Delta \sigma_s \quad (5)$$

$$\Delta \sigma'(t_1) = U(t_1) \cdot \Delta \sigma_s + U(t_1) \cdot p_v = U_{eq}(t_1) \cdot \Delta \sigma_s \quad (6)$$

Où :  $U(t_1)$  = degré de consolidation au  $t_1$   
 $\Delta\sigma_s$  = surcharge  
 $p_v$  = pression atmosphérique  
 $U_{eq}(t_1)$  = degré de consolidation équivalent au  $t_1$

Comme  $U_{eq}(t_1)$  excèdera  $U(t_1)$  pour tous les  $t > 0$ , l'augmentation de la contrainte effective pour la combinaison d'une surcharge et d'une consolidation atmosphérique sera toujours supérieure à celle d'une situation de surcharge seulement.

A la différence des charges physiques, la pression atmosphérique n'introduit pas de contraintes de cisaillement dans le sous-sol vu son caractère isotrope et, partant, ne causera pas des ruptures. Les affaissements résultants dus à la charge atmosphérique sont également isotropes. L'effet de la consolidation atmosphérique sur le taux de charge est démontré dans le schéma 2.

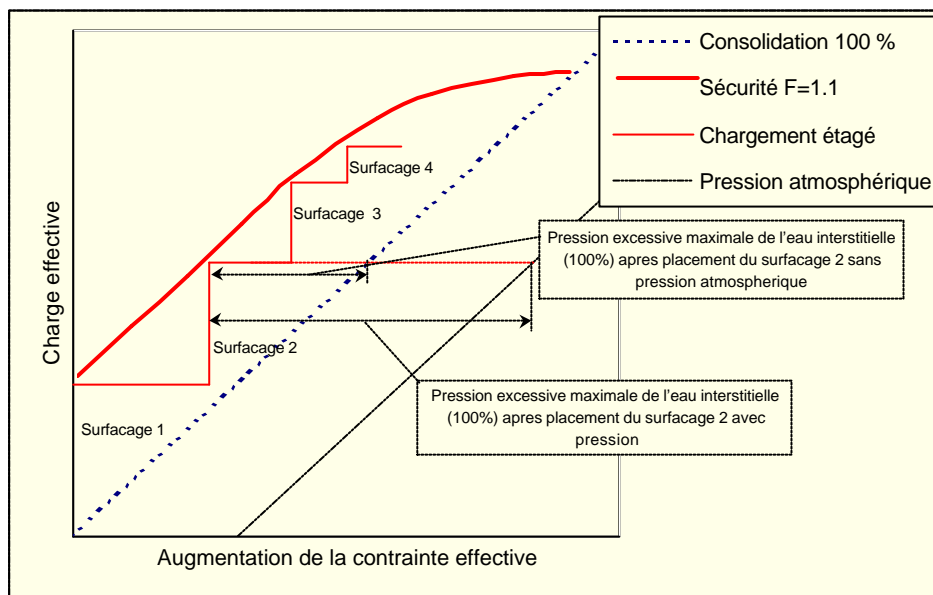


Schéma 2 - Relation entre le poids (réel) appliqué du remblai et de l'augmentation résultante de la contrainte effective

Ce schéma représente la relation entre le poids réel d'un remblai et l'augmentation de la contrainte effective au cours de la construction. La courbe, construite à partir d'un certain nombre de calculs de stabilité, représente la ligne de charge maximale correspondant à un coefficient de sécurité demandé ( $SF = 1,1$ ). La ligne de charge par palier montre les 4 stades d'un chemin de chargement arbitraire comprenant des phases de consolidation intermédiaires. La ligne de consolidation à 100 % représente la situation d'une charge effective égalisant l'augmentation de la contrainte effective. La ligne de pression de vide court en parallèle à la ligne de consolidation à 100 % à une distance horizontale égale à la pression atmosphérique. La pression maximale de l'eau interstitielle en surplus après placement d'un surfaçage peut être déterminée en soustrayant la ligne de charge étagée et la ligne de consolidation à 100 % dans le cas où aucun vide ne serait appliqué. Dans le cas d'une consolidation atmosphérique, les pressions de l'eau interstitielle en surplus seront représentées par la différence entre la ligne de charge étagée et la ligne de pression atmosphérique. Comme le taux de consolidation ne dépend que de  $c_v$  et de la longueur du chemin de drainage le temps pour la dissipation des pressions de l'eau interstitielle sera le même dans les deux cas. Ceci implique que le taux d'augmentation de la contrainte effective au cours de la consolidation atmosphérique avec une surcharge représentera plus que seulement des drains verticaux et une surcharge. Schéma 2 montre que cet effet permettra un taux de charge plus élevé.

### 3. METHODE ASAOKA

Grâce à la réduction de la période de consolidation, il devient de plus en plus important de surveiller l'évolution au cours du temps des tassements et de pronostiquer précisément l'affaissement final dans les premiers stades du processus de consolidation, puisque le délai permettant d'appliquer des mesures correctives est généralement limité.

Asaoka [1] a proposé une méthode simple pour prédire l'affaissement final en se basant sur des observations du tassement à intervalles de temps fixés. En traçant les lectures consécutives  $Z(t)$  par rapport à  $z(t+1)$ , on obtiendra une ligne qui, sur un grand intervalle, pourra être représentée selon la fonction linéaire :

$$z_{t+1} = \beta \cdot z_t + A \quad (7)$$

Où :  $\beta$  = inclinaison de la section linéaire du meilleur ajustement [-]  
 $A$  = intersection de la section extrapolée de l'ajustement linéaire avec l'axe Y

Quelques lignes dites « d'Asaoka », représentant divers stades de chargement d'un projet de réfection sont représentées dans Schéma 3 - Lignes d'Asaoka.

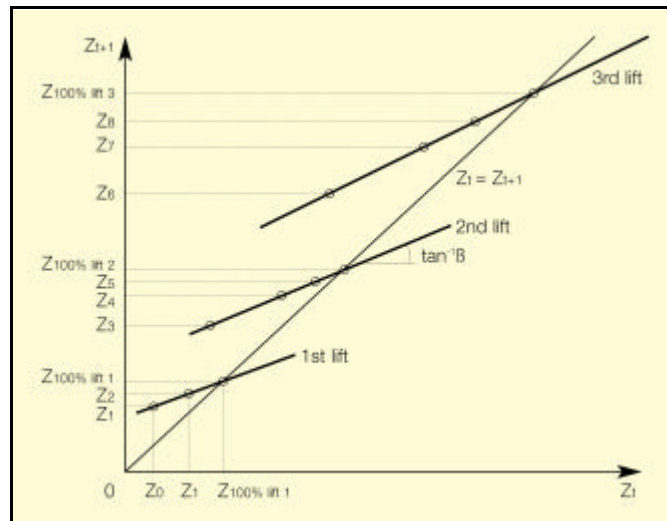


Schéma 3 - Lignes d'Asaoka

Le point d'intersection de la section extrapolée de cette droite et de la ligne  $z(t)=z(t+1)$  définira le tassement final total au moment où la consolidation sera atteinte (voir équation 8).

$$z_{100\%} = \frac{A}{1 - \beta} \quad (8)$$

La tangente des lignes inclinées peut être reliée au coefficient de consolidation équivalent  $c_{eq}$  (coefficient de consolidation comptant pour l'effet conjoint du drainage vertical et horizontal de l'eau interstitielle) en appliquant la formule suivante :

$$c_{eq} = \frac{-5 \cdot H^2 \cdot \ln \beta}{12 \cdot \Delta t} \quad (9)$$

Où :  $H$  = longueur du chemin de drainage [m]  
 $\Delta t$  = intervalle de temps [s]

Comme l'ont démontré par Luger et al. (1999), réf. [2], il n'est possible d'obtenir des prévisions fiables par cette méthode que si le degré de consolidation est supérieur à environ 40 %. De plus, comme le tassement final prédit compte également l'affaissement secondaire continuant linéairement selon le logarithme du temps, les résultats tracés tendent à dévier de la droite lorsque les tassements mesurés deviennent petits (par ex. lorsque le degré de consolidation devient élevé).

Pour améliorer la résolution graphique, Luger et al. [2] ont proposé de tracer la différence entre  $z(t+1)$  et  $z(t)$  par rapport à  $z(t)$ . Dans ce cas, l'affaissement final est représenté par le point d'intersection de l'ajustement linéaire des points de données avec l'axe X ( $z(t+1) = z(t)$ ).

#### 4. SYSTEME BEAUDRAIN

Le système BeauDrain est une technique de consolidation atmosphérique récemment développée dont la procédure d'installation novatrice. Grâce à une charrue de conception spéciale tirée par une grue hydraulique, des drains préfabriqués (à mèche) verticaux sont installés et coupés à des profondeurs prédéfinies sous le niveau du sol. Durant le déplacement de la charrue, un drain de collection horizontal est placé à une profondeur d'environ 3 m sous la surface du sol et est relié au drain vertical. Avant de se séparer de la charrue, le drain horizontal est également recouvert d'une géomembrane étanche afin d'assurer une étanchéité convenable entre le drain horizontal et les conditions atmosphériques. L'ensemble du système, auquel on fait généralement référence comme un rideau de drainage, est composé d'une rangée de drains verticaux, d'un drain horizontal et d'une étanchéisation. Il est placé en un simple passage de charrue. Schéma 4 illustre le système d'installation. Après le passage de la charrue, le sol compressible se referme de lui-même sur le drain horizontal, créant un joint supplémentaire en plus de la géomembrane. Le système complet est composé d'un certain nombre de rideaux de drainage connectés à des pompes à vide. La grue avec charrue est illustrée dans les schémas 5 et 6.

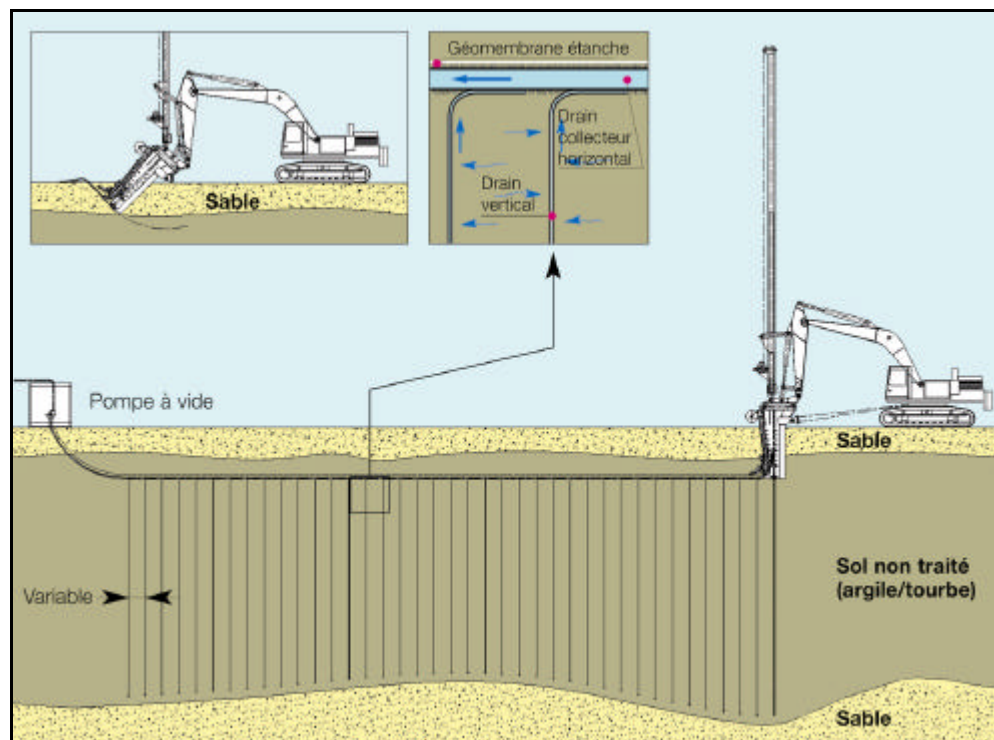


Schéma 4 - Installation du système BeauDrain





Schémas 5 et 6 - Machine BeauDrain avec détail de la charrue

La dépression mesurée aux pompes varie généralement entre 80 kPa et 90 kPa (0,8 à 0,9 bars). Selon la différence de hauteur entre la pompe et le drain horizontal, cela donne généralement lieu à une pression moindre d'environ 50 à 60 kPa dans le drain horizontal. Cette dépression de 50 à 60 kPa, correspondant à une surcharge équivalente d'environ 3,5 m de sable (sec), agit comme une charge sur les strates compressibles. Le schéma 7 montre clairement l'augmentation de la contrainte effective suite à la diminution de pression atmosphérique dans la masse du sol. L'effet net en découlant est une surcharge additionnelle, qui assurera l'obtention rapide du tassement demandé, et une augmentation de la résistance au cisaillement qui favorisera la stabilité (schémas de chargement accélérés, pentes plus douces dans les zones à espace limité).

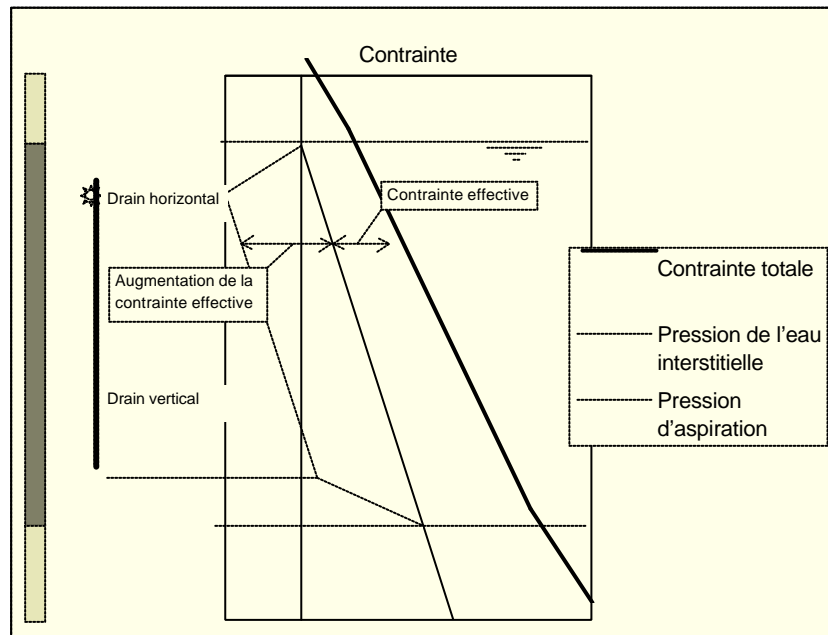


Schéma 7 - Augmentation de la contrainte effective par l'action de la pression d'aspiration

## 5. SITE TEST ZEVENHUIZEN

Le schéma 8 montre les lectures d'affaissement rassemblées dans 2 sections de test adjacentes du site test de Zevenhuizen : l'une équipée des drains à mèche verticaux traditionnels, l'autre du nouveau système de consolidation atmosphérique. Dans les deux sections, la surcharge de sable initiale s'élevait à 1,5 m. Après 100 jours, l'épaisseur de la couche de sable s'élevait à 3 m dans les 2 sections. Le schéma 9 donne un aperçu de la zone de test. La transition entre la section tassée par BeauDrain (gauche) et la zone à drains verticaux traditionnels (droite) est clairement visible. Bien que le type, la longueur et l'espacement des drains verticaux et l'épaisseur des surcharges de sable étaient identiques dans les deux sections, il est clair que le vide créé par pompage a accéléré considérablement la consolidation. Dans chaque section, un trou de forage a été pratiqué et des échantillons ont été prélevés. Les tests en laboratoire incluent des essais scissométriques, la détermination de la teneur en eau, des poids volumétriques et des essais par oedomètre.

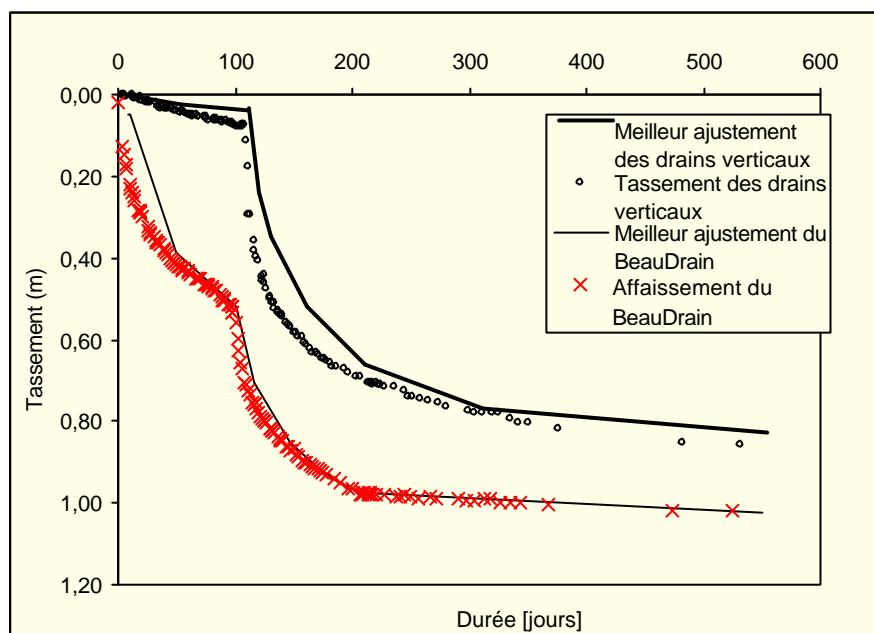


Schéma 8 - Lectures des affaissements Zevenhuizen et meilleur ajustement

Comme le montre le schéma 8, le taux d'affaissement dans la section par BeauDrain, dépassait celui de la section uniquement munie de drains verticaux. Les pompes ont été arrêtées après 206 jours. L'enlèvement de la surcharge atmosphérique dans la section par BeauDrain est clairement indiqué par la réduction soudaine du taux d'affaissement. L'analyse a posteriori a permis de conclure qu'environ 50 % de la pression atmosphérique totale, c'est-à-dire 50 kPa, avait été mobilisée comme surcharge additionnelle. Le coefficient de consolidation in situ a été calculé par la méthode Asaoka.





Schéma 9 - Aperçu du site test Zevenhuizen avec drains traditionnels verticaux à droite, avec BeauDrain à gauche

## 6. REMBLAIS RW11

Lors de la construction de la RW11, une nouvelle autoroute entre Alphen a/d Rijn et Bodegraven dans la partie ouest des Pays-Bas, un remblai pour un croisement à plusieurs niveaux d'une hauteur de 9 m au-dessus du niveau de sol existant a dû être construit en peu de temps. La stratigraphie de la zone, connue pour ses piètres conditions de sous-sol, est dominée par des séquences de tourbe et d'argile meubles à très meubles qui recouvrent le sable pléistocène à des profondeurs de 8 à 9 m sous le niveau du sol. Ces strates cohésives meubles à très meubles présentaient des résistances au cisaillement non drainées typiques de 5 à 10 kPa, avec des poids à l'unité en vrac d'environ 11kN/m<sup>3</sup> (tourbe) et de 15kN/m<sup>3</sup> (argile). Les tassements prédits variaient de 2 à 3 m. Le remblai était situé à proximité immédiate d'un canal de 10 m de large, qui aurait pu donner lieu à des problèmes de stabilité. Pour éviter les moments de flexion excessifs entre les pieux des butées du croisement à plusieurs niveaux, les tassements après pose des pieux devaient se limiter à 0,20 m en 30 ans.

Le système BeauDrain a donc été installé pour permettre la construction de ce remblai dans le délai disponible.

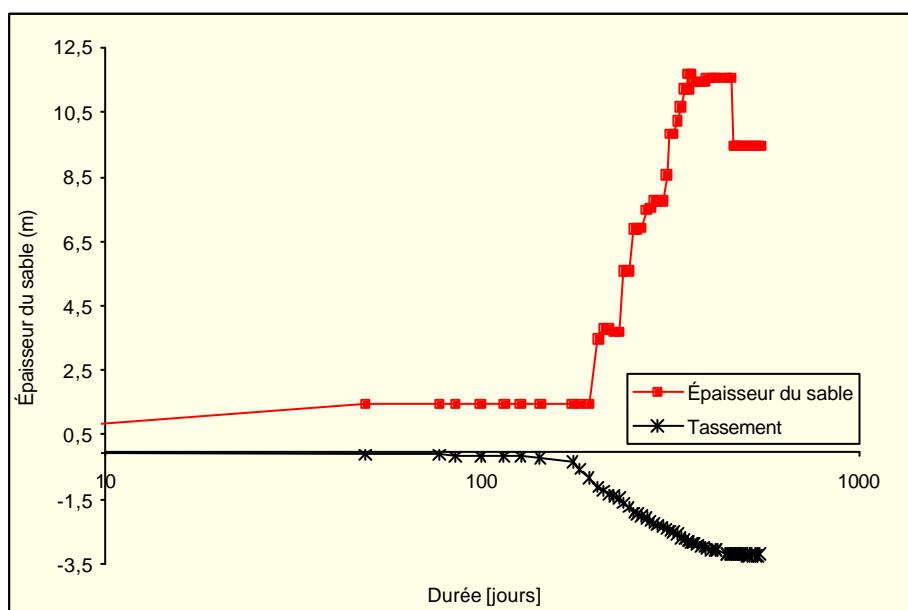


Figure 10 - Épaisseur du sable et affaissement correspondant en fonction du temps

Après avoir placé une plate-forme de travail de 1,0 à 1,5 m de sable, les drains verticaux ont été installés à 1 m d'espacement. La distance entre les rideaux était également d'1 m. Des balises de tassement ont été utilisées pour enregistrer les tassements et des piézomètres ont été installés pour mesurer les pressions de l'eau interstitielle. Le schéma 10 représente un enregistrement typique d'une balise de tassement montrant tant le tassement que l'épaisseur du sable placé en fonction du temps. Le coefficient de consolidation in situ a été déterminé par la méthode Asaoka. Des prévisions ont été réalisées pour les tassements à long terme sur la base de l'analyse à posteriori des lectures d'affaissement. Ces prévisions ont alors été utilisées pour déterminer le moment où le reste des tassements rencontrerait les critères de tassement et où les pompes pourraient être arrêtées.

Le nouveau système de consolidation atmosphérique étant opérationnel, il était possible de remonter le remblai en 120 jours et sans problèmes de stabilité à un niveau approximatif de 9 m au-dessus du niveau initial du sol en causant, dans le même temps, des tassements variant de 2 à 3 m.

A proximité immédiate de la situation de ce haut remblai, les fondations de l'autoroute elle-même avaient dû être consolidées sur une courte période. Le système BeauDrain, a été installé dans cette zone également, mais avec l'intention d'accélérer le processus de tassement de ce remblai bas et non d'améliorer la stabilité.

Une analyse a posteriori a été réalisée pour évaluer la pression de succion effective du système de consolidation atmosphérique. Les résultats sont présentés sous la forme d'une courbe contrainte (effective appliquée)/déformation, généralement utilisée pour illustrer les résultats d'un essai par oedomètre. Le calcul de la charge appliquée effective du poids du sable et de la surcharge est déterminé par le coefficient de consolidation de l'analyse Asaoka. A proximité de cette section basse par consolidation atmosphérique, des drains verticaux traditionnels ont été installés dans une zone à l'historique de charge identique et avec un espacement des drains similaire. Le schéma 11 montre les courbes de contrainte/déformation déterminée pour la plaque d'affaissement dans les deux zones et le meilleur ajustement pour la section BeauDrain. Cet ajustement inclut une surcharge atmosphérique de 50 kPa.

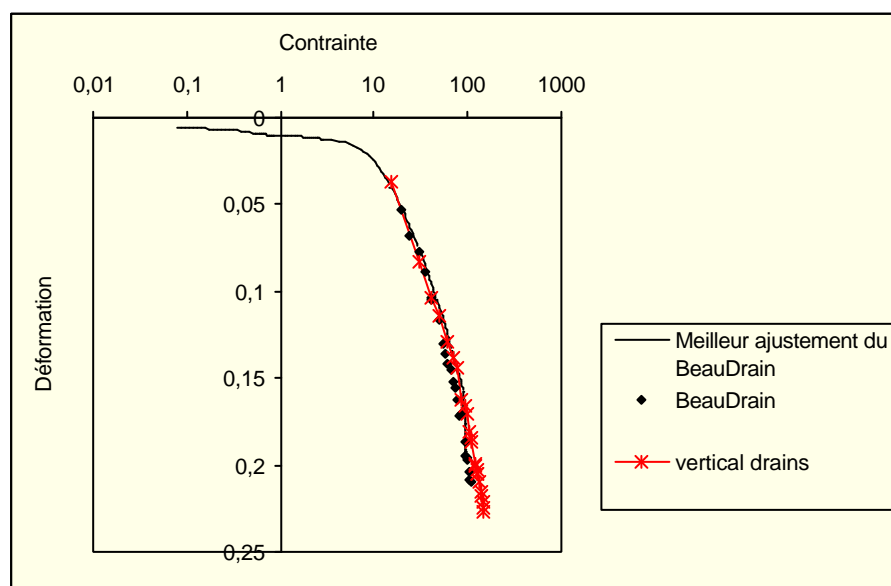


Schéma 11 - Courbe contrainte/déformation des sections à drains traditionnels et BeauDrain et meilleur ajustement pour ce système (y compris pression de vide de 50 kPa)

## 7. CONCLUSIONS

Le système BeauDrain combine la technique éprouvée du drainage horizontal et vertical et la consolidation atmosphérique à l'aide d'une procédure d'installation novatrice.

Les calculs a posteriori du site test de Zevenhuizen et des sections du projet RW11 indiquent qu'une surcharge d'environ 50 à 60 kPa peut être mobilisée par pompage. La nature isotrope de cette charge cause une augmentation de la contrainte effective sans augmentation du niveau de contrainte de cisaillement ni réduction des déformations horizontales durant la charge. Ceci donnera lieu à une augmentation de la résistance au cisaillement dans le sous-sol, permettant des taux de charge considérablement plus élevés sans perte de stabilité ou, autre solution, des pentes plus douces en réduisant la surface d'une construction. L'accélération du processus de consolidation et la réduction de tassements à long terme peuvent être obtenue sans recourir à de grandes surcharges, surtout pour les remblais de hauteur limitée.

La méthode Asaoka s'avère être un outil simple, puissant et raisonnablement précis pour prédire le coefficient de consolidation et le tassement final à un stade relativement peu avancé de la consolidation.

## 8. REFERENCES

- [1] Asaoka, A. (1978), "Observational procedure of settlement prediction" (Procédure fondée sur l'observation des prévisions d'affaissement), *Soils and Foundations*, Vol. 18, No.4, Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering
- [2] Luger, H.J. & Nooy v.d. Kolff, A.H. (1999), "*Geotechnical design and behaviour of the Kertih breakwater*" (*Conception et comportement géotechnique du brise-lames Kertih*), *Geotechnical Engineering for Transportation Infrastructure*, Barends et al. (eds), Balkema
- [3] Mesri, G. (1975), "*Discussion on: New design procedure for stability of soft clays*" (*Discussion sur la nouvelle procédure de conception relative à la stabilité des argiles meubles*). ASCE, *J. of GED.*, Vol. 101 (GT4)