

MÉTHODE OBSERVATIONNELLE POUR LE PRÉCHARGEMENT DES FUTURES VOIRIES IKEA-IICB À BAYONNE (64)

Jonathan BINDA¹, François BAGUELIN², Christian MANSUY¹, Jean-Baptiste SERRE³

¹ COLAS Sud-Ouest, Bordeaux, France

² Consultant FONDASOL, Paris, France

³ GEOLITHE, Crolles, France

RÉSUMÉ - Le site de 8ha, proche de Bayonne, comporte un remplissage alluvionnaire sur une épaisseur de 20 à 60 m. Afin de répondre aux exigences de deux projets différés d'un an environ, une consolidation par préchargement sur les futurs parkings et voiries a été envisagée. Au fil des chantiers, la méthode observationnelle a évolué afin de fiabiliser et valider le pourcentage de consolidation et l'estimation du fluage à 10 ans.

ABSTRACT – The site, nearly 8 hectares, is located near Bayonne, and includes alluvial deposits, 20m to 60m thick. To fulfill the needs of two construction projects, one year apart, soil consolidation by preloading has been planned over the future parking areas and roads. In the course of the works the observational method has evolved in order to ascertain the consolidation percentage and the estimate of creep at 10 years.

Introduction

Ce document présente l'instrumentation et le dimensionnement interactif de la méthode observationnelle des préchargements réalisés de septembre 2013 à août 2015, dans le cadre des travaux de voiries et réseaux divers des nouveaux magasins IKEA et du forum commercial Ikea Centre Bayonne (IICB). Ce complexe commercial se situe à l'entrée Est de Bayonne dans les marais d'Ametzondo au sud de l'Adour. Les constructions des deux projets se sont succédé avec un décalage d'un an. Après une présentation générale des chantiers, nous détaillerons les instruments mis en place pour le suivi des préchargements, avec notamment le bénéfice apporté par le retour d'expérience du premier projet. Puis nous terminerons par l'exploitation et l'interprétation des mesures réalisées.

1. Présentation générale du chantier

1.1. Description du chantier

L'entreprise COLAS Sud-Ouest, en groupement avec Franki et Botte Fondations, puis avec Solétanche Bachy et Franki Fondations, s'est vu attribuer en 2013 puis 2014 les lots « voiries et réseaux divers » et « fondations spéciales et traitement du sol », pour les constructions successives du magasin IKEA, de février 2013 à août 2015, et du forum commercial IICB, de février 2014 à août 2016.

Pour les travaux de voiries, réseaux divers et traitement du sol, COLAS Sud-Ouest aura réalisé au total 54 000m² d'enrobés, posé 4,2km de réseaux pluviaux et utilisé 550 000 tonnes de matériaux de préchargement. Par ailleurs 2000 km de drains verticaux ont été foncés, certains jusqu'à 55m de profondeur, ce qui constitue une particularité unique en France.

1.2. Contexte Géologique

Ancien marais, le site était remblayé en partie par des matériaux externes inconnus et par des apports en matériaux de concassé calcaire provenant du comblement du Charre. Sur l'ensemble du site, les alluvions, d'une épaisseur de 20 à 50m, proviennent du remplissage d'un ancien affluent de l'Adour. Ces alluvions sont de nature argilo-sableuse vasarde, très compressibles, présentant parfois de la matière organique. En s'approchant du lit de l'Adour, au Nord du site, des lentilles sableuses d'épaisseur métrique à quelques dizaines de mètres sont aussi présentes. Enfin le substratum est variable et correspond à des marnes argileuses et sableuses mais aussi à des calcaires et brèches d'argile rouge à inclusions de gypse. Ce dernier se trouve entre 20 à 60m de profondeur.



Figure 1. Vue générale des deux projets

1.3. Aspects contractuel et objectifs

En ce qui concerne les travaux de voiries et réseaux divers, les marchés et les études de sols prévoient une technique de préchargement sur une durée de 10 mois.

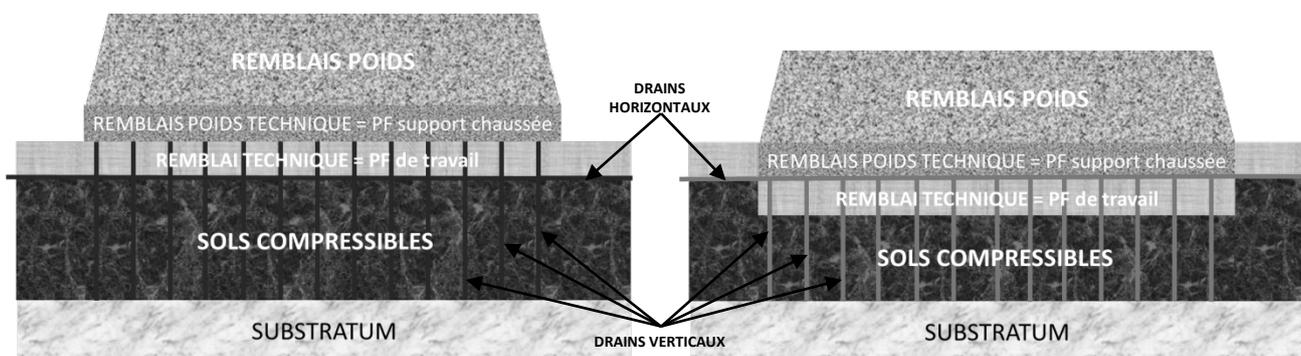


Figure 2. Principe de la technique de préchargement.

La figure 2 représente le préchargement à t_0 (gauche) et à $t_0 + 6$ mois (droite)

L'objectif principal était de limiter les tassements différentiels, entre les voiries et les bâtiments, à 10 cm après dix ans de mise en service des magasins. Les objectifs secondaires étaient d'obtenir une consolidation de 95% à 6 mois et d'observer le fluage pendant 4 mois. COLAS Sud-Ouest s'est associée à Fondasol afin d'optimiser les surcharges et le drainage vertical des préchargements. Ils ont pu être ainsi réduits à une durée moyenne de 6 mois avec une consolidation de 90% atteinte au bout de 4 mois et 2 mois d'observation du fluage. Pour respecter les objectifs, la méthode observationnelle était prescrite. Une lourde instrumentation a été mise en place. COLAS Sud-Ouest a fait appel à Géolithe afin de fiabiliser la pose et le suivi régulier de cette instrumentation.

2. Instrumentation IKEA et IKEA Centre – Méthode observationnelle

2.1 Présentation générale

La méthode observationnelle ainsi mise en place a dû s'adapter au fil des chantiers, notamment aux contraintes liées à l'interférence des activités des différents intervenants et surtout à l'évolution des résultats observés.

L'instrumentation a été établie suivant plusieurs profils de mesures : 8 sur IKEA et 5 sur IKEA Centre. Chacun de ces profils comportaient au minimum :

- 1 profilomètre hydrostatique
- 2 ou 3 capteurs de pression interstitielle (CPI)
- 2 boules tassométriques (BT)
- 1 tassomètre de profondeur pour certains profils
- 1 inclinomètre flottant ou ancré
- 1 essai CPTu avec essais de dissipation avant chargement et après déchargement
- plusieurs plots topographiques
- 1 piézomètre
- parfois, 1 pige topographique remontant d'une plaque posée au niveau du TN

La figure n°3 montre un profil instrumenté type.

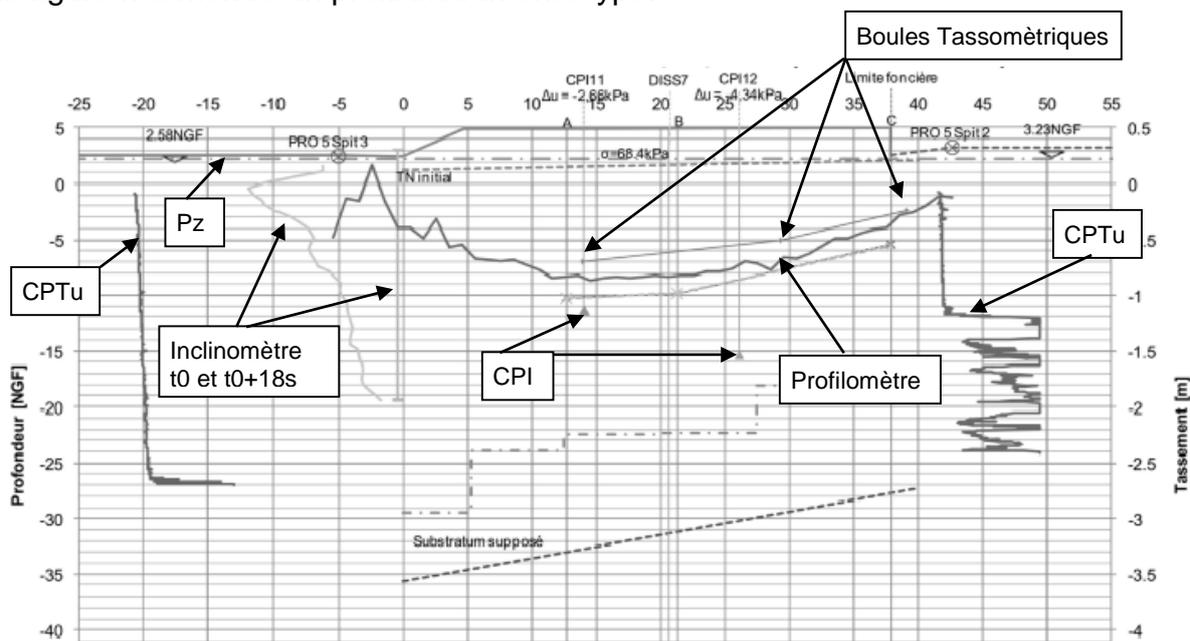


Figure n°3. Récapitulatif des essais et de l'instrumentation d'un profil.

2.2 Intérêt et retour d'expérience

L'objectif de cette instrumentation très fournie était de pouvoir corréler les mesures de tassements des différents instruments, afin d'obtenir des valeurs précises et sûres.

Il a été par exemple possible pour les profilomètres, qui donnent en fonction du temps le tassement suivant un profil donné, avec une précision de l'ordre de 2 cm, de vérifier et d'améliorer leur précision en plusieurs points. Ceci en les recoupant avec les plots topographiques posés en tête du remblai de préchargement. En revanche les mesures des plots topo ont l'inconvénient de démarrer seulement quand le remblai est terminé. C'est une des raisons pour lesquelles sur le deuxième chantier d'IICB des piges topographiques ont été mises en œuvre à la base des remblais de préchargement. Celles-ci se sont révélées très fiables et présentent l'avantage de fournir le tassement absolu pendant toute la durée du chantier, y compris lors de la phase de la montée des remblais.

En ce qui concerne les boules tassométriques (BT), il a été remarqué sur le premier chantier d'IKEA que les résultats étaient irréguliers sur le long terme. Elles n'ont donc servi que de référence au démarrage pour le chantier d'IICB.

Les résultats des tassomètres magnétiques ont quant à eux permis d'évaluer la répartition des tassements en fonction de la profondeur.

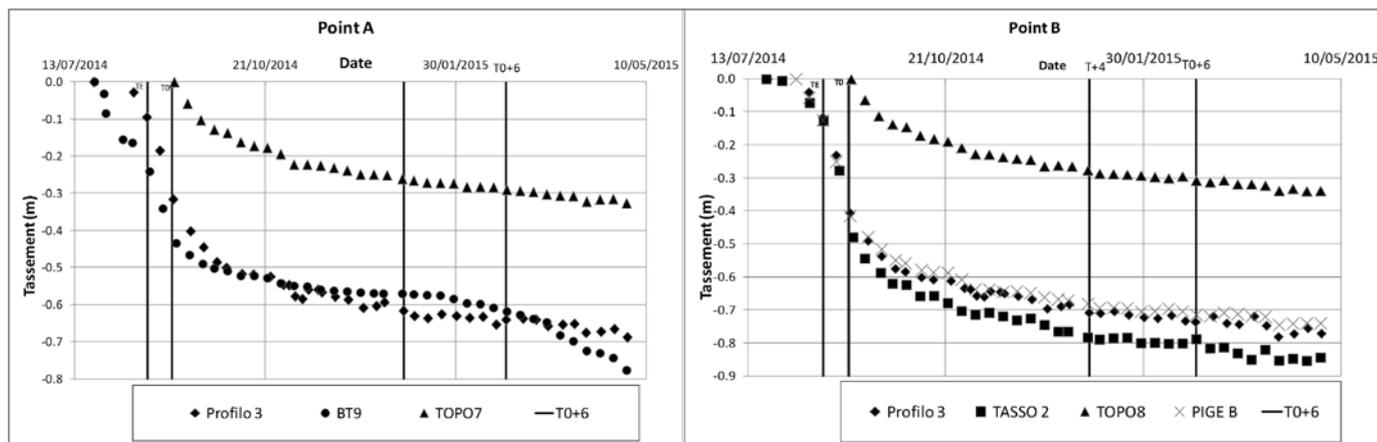


Figure n°4 : IICB – Mesures de tassement en fonction du temps en deux points d'un profil

La figure n°4 de gauche, qui représente l'ensemble de l'instrumentation sur un point précis, montre la concordance des mesures entre profilomètre et plot topographique ainsi que la dérive des mesures de la BT. La figure de droite met en évidence l'accord entre un profilomètre, la pige topographique et la tête du tassomètre magnétique de profondeur.

Un des autres objectifs de cette instrumentation était de pouvoir recouper les méthodes d'appréciation de la consolidation. Le suivi des tassements a donc été complété par des mesures de pression interstitielle, au moyen :

- des CPI et Pz en continu : valeur moyenne dépendant de la longueur de la cavité.
- des essais de dissipation à t_{100} au CPTu : valeur ponctuelle à un instant donné.

Concernant les CPI, on a constaté sur IKEA une discordance des résultats des cellules (électriques et à corde vibrante), vraisemblablement à cause d'une déformation trop importante de la cavité. On a donc utilisé sur IICB une mise en place par fonçage et une automatisation des relevés. Ces modifications ont amélioré significativement les résultats.

Les inclinomètres ont permis d'évaluer les déplacements latéraux engendrés par le remblai de préchargement. Deux types d'instruments ont été installés : flottant (profondeur 20 m) et ancré dans le substratum (de 3 m minimum).

2.3 Le suivi des mesures dans le temps

Outre l'instrumentation très fournie, la bonne interprétation des mesures dépendait également d'un suivi régulier. Pour chaque mesure d'instrumentation effectuée, un nivellement de l'ensemble des plots béton de référence a été réalisé par un géomètre.

Le nombre de relevés de mesures a pu être optimisé sur l'ensemble de l'instrumentation pendant les phases de consolidation entre les chantiers IKEA et IICB au vu de la concordance des résultats obtenus.

Toutes les semaines, les mesures de chaque profil étaient compilées, triées et représentées sur tableur suivant un intervalle de confiance. L'ensemble des mesures brutes était synthétisé dans un compte rendu bimensuel. Celui-ci était diffusé à l'ensemble des intervenants, Maître d'Ouvrage, Maîtrise d'Œuvre et bureaux de contrôles, afin d'être interprété et de lever les points d'arrêts à l'avancement du chantier.

Tableau n°1 : récapitulatif des fréquences de mesures de l'ensemble de l'instrumentation.

	IKEA	IICB
Mesure T0 (1)	1	1
Phase de montée des remblais (1)	1 / sem	1 / sem
Phase de consolidation primaire (*) (2)	2 / sem	1 / sem
Phase de consolidation secondaire (**)	2 / sem	1 / sem
Phase de déchargement	1 / sem	1 / sem
Après déchargement (2)	1	1

(*) La phase de consolidation primaire a été limitée à t_0+4 mois

(**) La phase de consolidation secondaire a duré en moyenne jusqu'à t_0+6 mois afin d'observer le début du fluage et l'estimer à 10ans.

(1) Lors de cette phase, l'accent a été mis sur la surveillance des mesures de pressions interstitielles (CPI) afin de vérifier la non-liquéfaction des sols lors de la mise en place du préchargement.

(2) Des essais CPTu avec essai de dissipation à t_{100} ont aussi été effectués durant ces phases de préchargement.

3 Exploitation et Interprétation des mesures

3.1 Phase de consolidation primaire

Cette phase a duré jusqu'à t_0+4 mois. Elle a permis l'observation de l'augmentation de la pression interstitielle et sa dissipation à 90%, ainsi que l'obtention de 95% de la consolidation primaire définie par la méthode ASAOKA.

La méthode d'Asaoka permet d'obtenir un pourcentage de consolidation par rapport au tassement total. Celui-ci n'est pas immédiatement disponible pour certains types de mesure. Par ailleurs s'il l'est, la consolidation est surestimée en ce qui concerne la dissipation des pressions interstitielles.

La figure 5 présente deux graphes Asaoka au profil P4, point A, zone 3 d'Ikée à 4 mois : moyenne de 5 points du profilomètre encadrant le point A pour 'profilo', et BT15. Noter qu'en général la dispersion des BT produit une estimation du tassement incertaine : à la BT 16, proche du point B, on a obtenu 3m de tassement, résultat manifestement erroné.

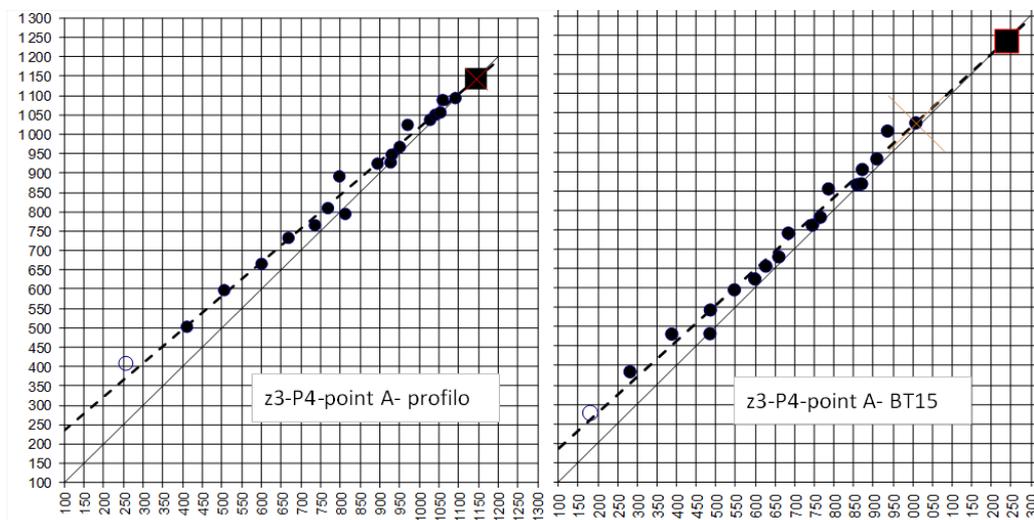


Figure n°5. Graphes d'Asaoka, en mm. En abscisse : $s(i)$. En ordonnée : $s(i+1)$

Une méthode alternative à la méthode d'Asaoka (Baguelin, 1999) est d'ajuster d'une courbe de consolidation radiale (tableur FINCONSOLRAD), ce qui permet de :

- combiner plusieurs types de mesures (profilo, topo, voire pige).
- séparer la contribution des strates argileuses et des strates sableuses,
- donner l'avancement de la consolidation non seulement en proportion du tassement total final, mais aussi en termes de vitesse de consolidation des strates argileuses.

Les figures 6 et 7 montrent un exemple des données au point A de la zone 3 d'IKEA.

En figure 6, les mesures brutes (marqueurs vides) ont été décalées d'une même quantité pour un appareil donné, de manière à former un faisceau aussi étroit que possible (marqueurs pleins). Cependant on voit que la BT15 diverge après la phase initiale.

La figure 7 montre les points pris en compte dans l'ajustement de FINCONSOLRAD (cercles pleins), et les points ignorés (cercles vides) : il s'agit du tassement produit lors de la montée des remblais, car la charge n'est pas constante ; et des mesures de la BT, non fiables. Cette prise en compte augmenterait significativement l'écart-type de l'ajustement.

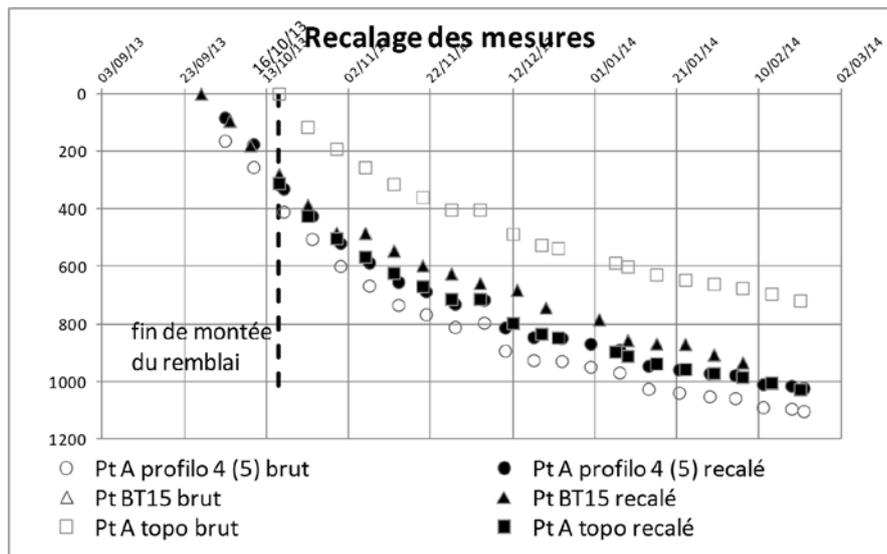


Figure n°6. Mesures au point A du profil 4, zone 3 du projet Ikéa.

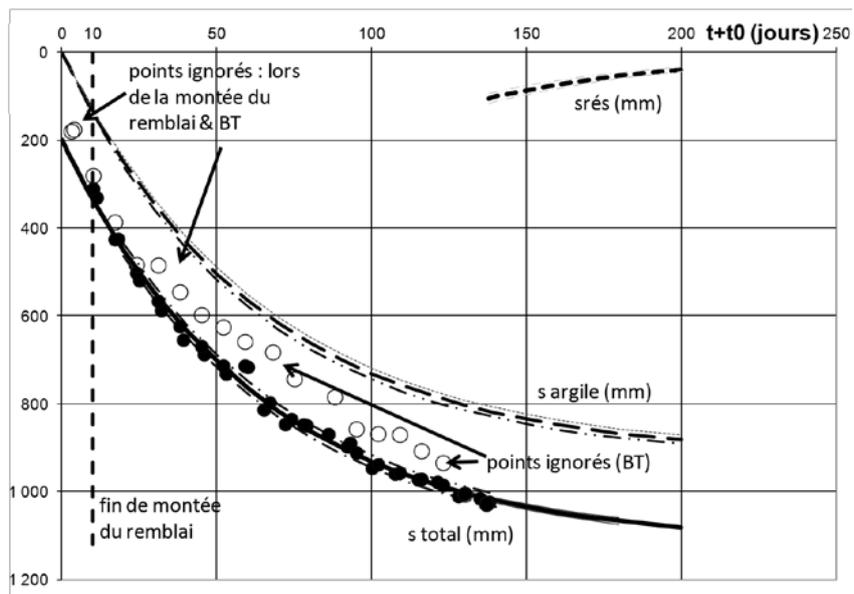


Figure n°7. Mesures BT au point A du profil 4, zone 3 du projet Ikéa

La courbe ajustée sur les points retenus (s total) est de la forme :

$$s = a [1 - \exp(-t/c)] + b \quad (1)$$

La consolidation concerne le terme 'a', qui représente le tassement des strates argileuses (courbe 's argile'). Le terme 'b' est acquis à la fin de la montée des remblais (environ 20 jours) et représente celui des strates sableuses ou limoneuses. Le graphique montre aussi le tassement résiduel de consolidation en fonction du temps postérieur aux mesures. La vitesse de consolidation est exprimée par la constante de temps 'c'. Pour un taux de consolidation de 90% en 4 mois, sa valeur doit être au plus de 53 jours. Dans l'ensemble ce critère a été respecté (Baguelin *et al.*, 2016). Quelques valeurs de 'c' dépassent ce seuil, mais il faut remarquer que le critère sur le taux de consolidation des strates argileuses est plus sévère que celui portant sur le taux du tassement total.

3.2 Phase de consolidation secondaire – Phase 3

Au bout de 4 mois, on commence à voir se manifester le fluage. Dans l'ajustement sur les points de mesure, on remplace la courbe de consolidation par une courbe de fluage de la forme :

$$s = s_0 + d \cdot \text{Ln} \left(1 + \frac{t - t_0}{t_{F0}} \right) \quad (2)$$

Le raccord se fait au point de coordonnées (t₀ ; s₀), le paramètre t_{F0} caractérise une courbe 'isotache' (même vitesse) dans le diagramme de type œdométrique (log σ' ; e), courbe parallèle à la droite C_c. Cette interprétation est une application du modèle de fluage de Bjerrum (1967). Pour une valeur donnée du paramètre 'd', qui caractérise l'intensité du fluage, on détermine le temps t₀ du point de raccord et le paramètre de l'isotache t_{F0} de manière à ce que les courbes de consolidation et de fluage aient même pente et même courbure. Il en découle la valeur de s₀. La valeur de 'd' est ajustée afin de minimiser la somme des écarts quadratiques entre mesures et valeurs théoriques. Le paramètre 'd' est lié à la valeur moyenne de C_α, coefficient de fluage habituel, et à l'épaisseur cumulée H des couches soumises à fluage, selon la relation : d = H.C_α / Ln(10) = 0,434 H.C_α.

Au final, sont calés sur l'ensemble des points de mesure de tassement les paramètres moyens : paramètres (a, b, c) sur la partie consolidation (4 mois), paramètre 'd' sur la partie fluage.

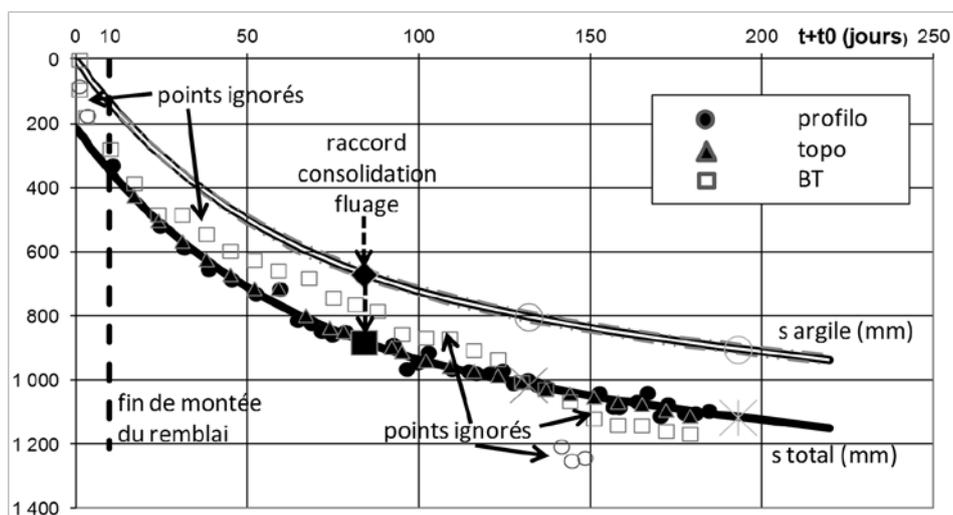


Figure n°8. Calage d'une courbe consolidation-fluage (point A du profil 4, zone 3 du projet Ikéa)

L'étape suivante de l'interprétation est de prévoir ce qui se passe après le déchargement des remblais, notamment pendant la période de service de l'ouvrage. Le modèle de fluage de Bjerrum fournit les éléments nécessaires pour répondre à cette question. Un tableur spécifique "multicouches" a été mis au point, qui tient compte du niveau des contraintes aux différentes profondeurs, que ce soit pour la contrainte initiale du sol en place, ou pour les charges apportées par les remblais. Ceci est indispensable car l'effet bénéfique du préchargement diminue rapidement avec la profondeur, suivant le rapport ($\sigma'_{1} / \sigma'_{2}$) entre la contrainte verticale effective σ'_{1} imposée au préchargement et la contrainte verticale effective σ'_{2} obtenue après déchargement.

3.3 Corrections apportées

Le critère de fluage imposé était que le tassement pendant les 10 premières années de service des parkings et des voiries soit d'au plus 10 cm. Cette exigence a pu être respectée sans modification du planning de préchargement sur presque toutes les zones. Fait exception une zone sur IKEA (zone 3), qui a nécessité un rechargement de 1,20 m au bout de 6 mois, avec maintien de la charge ainsi majorée jusqu'au huitième mois. L'étude a été menée toujours selon le modèle de Bjerrum, avec les aménagements nécessaires pour tenir compte notamment de la mise en place différée de la charge supplémentaire.

4. Conclusion

La méthode observationnelle et l'instrumentation très fournie ont permis de fiabiliser et optimiser les mesures des tassements observées lors des préchargements. Nous avons pu en effet réduire le nombre de prise de mesures par semaine sans détériorer l'interprétation de ces dernières. Nous avons également pu constater que les boules tassométriques n'étaient fiables que sur une très courte durée et que les CPI mises en place par fonçage étaient plus fiables que celles posés en cavité par tubage. Par ailleurs, les piges topographiques se sont révélées d'un grand intérêt.

Pour que l'interprétation des valeurs brutes soit la plus concordante possible, la prise de mesure a été systématiquement faite par intervalles de temps réguliers. La diversification des instruments a permis de recouper les résultats fournis par les différents dispositifs. Ces comparaisons ont permis d'écarter avec certitude les instruments de mesures dont les résultats présentaient des incohérences.

Enfin, la densité et la fiabilité des mesures ont permis d'identifier très rapidement les dérives potentielles sur les objectifs de fluage. Il a donc été possible d'anticiper la mise en place d'actions correctives maîtrisées, sans pénaliser les dates de livraison des différentes plateformes.

5 Références bibliographiques

- Baguelin F. (1999). La détermination des tassements finaux de consolidation : une alternative à la méthode d'Asaoka. *Revue Française de Géotechnique n°86, 9 pages.*
- Baguelin F., Finiasz A. (2016). Diamètre équivalent d'un drain plat et suivi de la consolidation sur un cas de préchargement. *JNGG 2016, 8 pages.*
- Bjerrum L. (1967). Engineering geology of Norwegian normally-consolidated marine clays as related to settlements of buildings. *Géotechnique, 17, pp.81-118.*