

RE-ESTIMATION DES TASSEMENTS FINAUX EN COURS DE SUIVI

REASSESSMENT OF SETTLEMENTS BASED ON FOLLOW-UP

Eric VERMOOTE¹, Marc FAVRE², Damien FUENTES³

1 GEOS Ingénieurs Conseils, Archamps, France

2 GEOS Ingénieurs Conseils, Archamps, France

3 GEOS Ingénieurs Conseils, Archamps, France

RÉSUMÉ — Les différentes approches de calcul de tassement utilisées par les géotechniciens peuvent donner des valeurs d'amplitude de tassement pouvant varier d'un facteur 2/3 à 3/2.

Face à ce degré d'incertitude, il est souvent nécessaire d'avoir recours aux possibilités offertes par les Eurocodes, impliquant un suivi fin et adapté des déplacements verticaux une fois les ouvrages mis en place de manière provisoire ou définitive.

Ces mesures, généralement disponibles au fil de l'eau, permettent souvent d'estimer, à partir de méthodes simples, l'amplitude maximale attendue à long terme, voire même le pourcentage de consolidation à une date donnée :

- La méthode d'Asaoka, traçant le déplacement à un instant donné en fonction du déplacement à l'instant précédent ;
- La méthode de Recordon, qui recherche une loi exponentielle du tassement en fonction du temps ;
- La méthode d'Al-Shamrani, qui intègre une loi hyperbolique du tassement en fonction du temps.

Ces lois intègrent généralement le comportement des sols soumis à la consolidation primaire, mais ils peuvent également introduire le phénomène de consolidation secondaire.

ABSTRACT — The amplitude of settlement values being calculated from engineers according to different approaches can vary from a factor 2/3 to a factor 3/2.

Due to this degree of uncertainty, it is usually necessary to use the possibilities offered by the Eurocodes, involving a close and appropriate monitoring of vertical displacements once the structure is being established.

These measurements, generally available gradually, allow to estimate the expected maximum amplitude of settlement in the long term and even more the percentage of the consolidation on a given date from simple methods:

- The Asaoka method, plots the displacement at a given moment in terms of the displacement of the previous one
- The Recordon method, searches an exponential law of the settlement in terms of time
- The Al-Shamrani method, integrates an hyperbolic law of the settlement in terms of time

These laws integrate generally the behavior of soil under primary consolidation, but they can introduce the phenomenon of secondary consolidation as well.

1. Introduction

L'estimation des tassements appliquée à des projets d'infrastructures linéaires ou de bâtiment peut donner en termes d'amplitude, des résultats très différents en fonction de l'approche utilisée, principalement de type pressiométrique et/ou œdométrique, mais aussi de la méthode (éléments finis, ou application de formules simplificatrices, en fonction de la géométrie de la fondation).

Les durées d'acquisition de ces tassements sont calculées avec une incertitude encore plus grande puisqu'elles intègrent des écarts liés à la mesure du coefficient de consolidation verticale C_v , cumulés à ceux de la méconnaissance du terrain en place.

Face à ces calculs d'amplitudes et de durées, les géotechniciens ont parfois le retour du comportement réel de la colonne de sol soumis à un chargement, par un suivi des tassements et des durées d'acquisition.

Ces mesures, qui peuvent être réalisées dans le cadre d'une approche observationnelle au sens de l'Eurocode, permettent d'affiner les calculs théoriques et donc les dispositions constructives qui en découlent. Tout au long de l'observation, il est ainsi possible d'estimer les amplitudes finales, ainsi que la date à laquelle elles seront atteintes.

L'objectif de cet article est de :

- rappeler les différentes méthodes à disposition des géotechniciens pour estimer l'amplitude des tassements finaux dus à la consolidation des sols, ainsi que les durées pour les atteindre.

- présenter des exemples d'application de ces méthodes sur des projets opérationnels.

2. Les différentes méthodes d'estimation des tassements finaux

2.1. Méthode d'Asaoka

La méthode d'Asaoka consiste à tracer graphiquement le déplacement calculé (ou mesuré) à un instant (t) en fonction du déplacement calculé (ou mesuré) à un instant précédent (t-1).

Avec cette méthode, la consolidation primaire est considérée comme terminée, et donc la fin des déplacements verticaux est effective, dès lors que la droite passant au mieux au sens des moindres carrés intercepte la première bissectrice du graphique.

En effet, si tel est le cas, alors on en conclut que les déplacements à l'instant t+1 sont identiques aux déplacements à l'instant t, ce qui signifie que l'équilibre est atteint.

La principale difficulté réside dans le fait que cette méthode graphique est valable si les mesures sont réalisées pour des intervalles de temps constants. Cette condition, très rarement appliquée en pratique, nécessite d'interpoler les mesures pour des intervalles de temps réguliers.

La figure 1 présente la construction d'Asaoka dans le cadre de l'étude d'un remblai autoroutier.

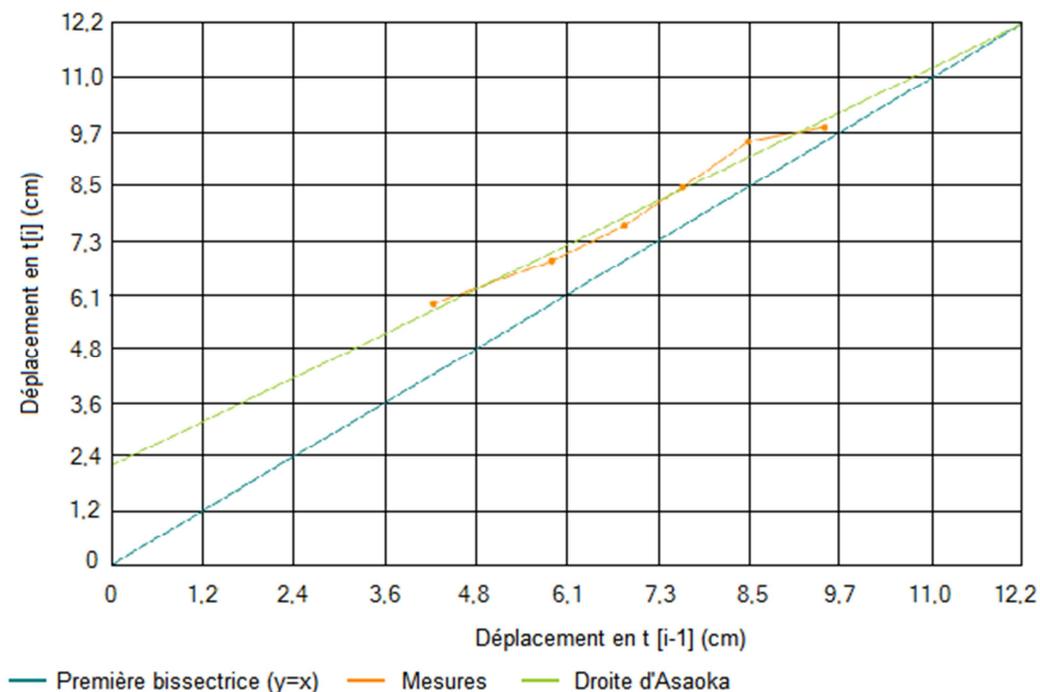


Figure 1 : Application de la méthode d'Asaoka à un remblai autoroutier

2.2. Méthode de Recordon

La méthode de Recordon consiste à résoudre analytiquement l'équation de la diffusion de la surpression interstitielle en fonction de la profondeur et du temps. Cette équation, d'une forme similaire à celle utilisée couramment par les thermodynamiciens, est de la forme :

$$\frac{\partial^2 u(z,t)}{\partial z^2} = \frac{1}{C_v} \frac{\partial u(z,t)}{\partial t} \quad (1)$$

La solution exacte de cette équation aux dérivées partielles établie par Terzaghi s'écrit sous la forme d'une série entière en fonction du degré de consolidation, dont le premier terme se traduit en termes de déplacements suivant l'équation en négligeant les autres termes (Recordon, 1988) :

$$\Delta H(t) = \Delta H_{\infty}(1 - B \cdot e^{-C \cdot t}) \quad (2)$$

Cette méthode revient donc à considérer que le tassement suit une loi exponentielle, où :

- ΔH_{∞} est le tassement final ;
- B est un coefficient permettant la correspondance entre le début de la consolidation et le début des mesures ;
- C est un coefficient proportionnel au coefficient de consolidation verticale.

Avec cette méthode, il est possible de calculer autant de valeurs de ΔH_{∞} et B qu'il y a de mesures de déplacement du sol en fonction du temps. De plus, elle permet de déterminer non seulement le tassement final du sol mais également le temps correspondant à un certain degré de consolidation

La figure 2 donne la représentation graphique de la méthode de Recordon pour différentes valeurs de coefficients B et C.

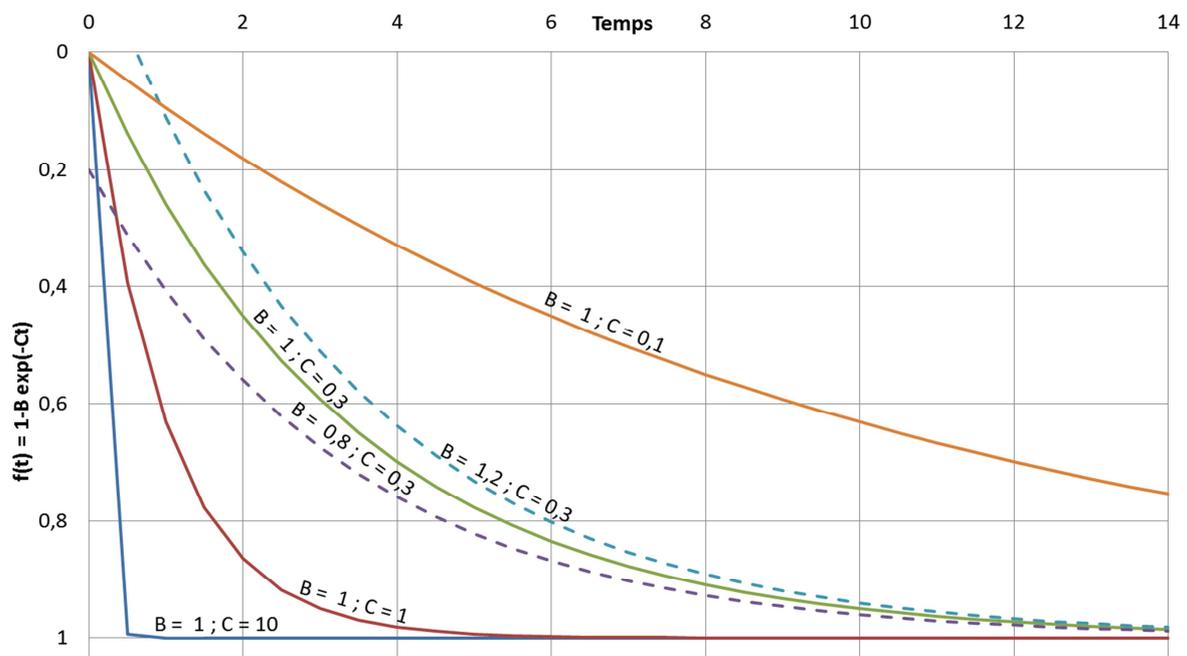


Figure 2 : Influence des coefficients B et C sur la solution de Recordon

2.3. Méthode d'Al-Shamrani

Pour des valeurs de déplacements δ_i mesurés à des temps t_i , la méthode d'Al-Shamrani consiste à représenter les valeurs (t_i / δ_i) en fonction du temps, et à rechercher la droite qui passe au mieux par ces points au sens des moindres carrés. Cette méthode revient à considérer que le tassement suit une loi hyperbolique, puisque :

$$\frac{t}{\delta} = A \cdot t + B \quad (3)$$

Revient à écrire :

$$\delta(t) = \frac{t}{A \cdot t + B} \quad (4)$$

Le tassement final est donné par l'inverse du coefficient A, le pourcentage du tassement primaire étant de l'ordre de 82 % de cette valeur (Al-Shamrani, 2004).

La figure 3 montre la représentation d'Al-Shamrani dans le même cadre que celui de la figure 2 (bâtiment sur sol compressible). Les résultats numériques donnent $A = 5,02 \text{ m}^{-1}$, soit un tassement total de 0,19 m et un tassement primaire de 0,16 m.

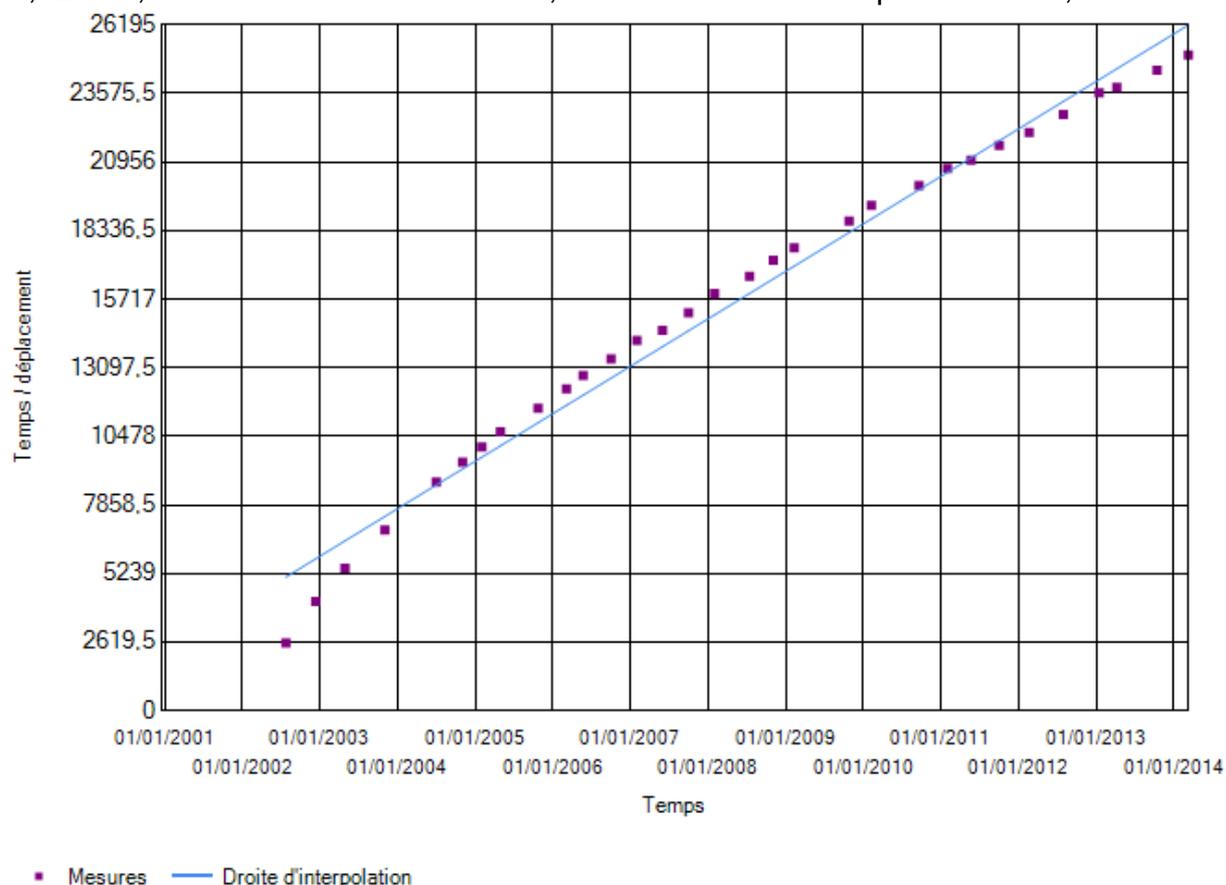


Figure 3 : Application de la méthode d'Al-Shamrani à un bâtiment sur sol compressible

3. Comparaison des méthodes : utilisation du logiciel GEODEPL

3.1. Application à un bâtiment sur sol compressible

Un bâtiment à usage commercial fondé sur sol compressible est le siège de tassements "anormaux" constatés immédiatement après la construction. Les experts d'assurance puis judiciaires ont décidé d'un suivi de l'ouvrage. Ce suivi comporte, entre autres, les mesures semestrielles de repères fixés sur le dallage.

Les altitudes mesurées au 1/10 mm constituant des données factuelles, sont récapitulées dans le tableau suivant :

Tableau 1 : Tassements mesurés au droit du bâtiment

Date	13/12/2000	25/07/2002	12/12/2002	29/04/2003	03/11/2003	02/07/2004
Tassement (m)	0	0,0696	0,0768	0,0843	0,0936	0,1018
Date	02/11/2004	01/02/2005	29/04/2005	24/10/2005	06/03/2006	24/05/2006
Tassement (m)	0,1065	0,1094	0,1117	0,1183	0,122	0,1233
Date	02/10/2006	01/02/2007	01/06/2007	01/10/2007	01/02/2008	15/07/2008
Tassement (m)	0,1273	0,1295	0,1343	0,1364	0,1378	0,1424
Date	03/11/2008	10/02/2009	26/10/2009	08/02/2010	20/09/2010	01/02/2011
Tassement (m)	0,1437	0,1455	0,1513	0,1521	0,1575	0,159
Date	23/05/2011	03/10/2011	21/02/2012	31/07/2012	15/01/2013	08/04/2013
Tassement (m)	0,1619	0,1638	0,1666	0,1686	0,1698	0,1717

En fonction des méthodes décrites ci-avant, les résultats donnés par le logiciel GEODEPL sont synthétisés sur la figure 4.

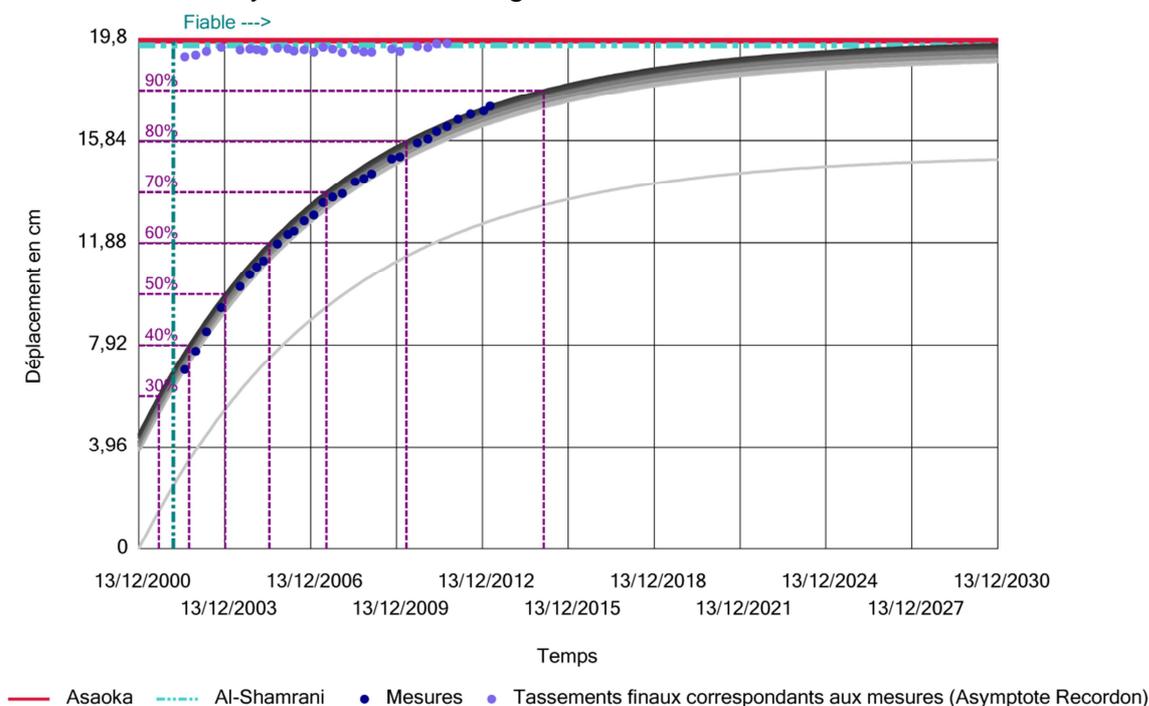


Figure 4 : Comparaison des méthodes - Tassements finaux estimés en fonction du temps (Bâtiment sur sol compressible)

L'application de ces méthodes, qui semblent toutes converger vers une valeur limite, à l'ensemble des mesures du bâtiment, permet de visualiser les tassements résiduels estimés, comme le montrent les figures 5 à 7.

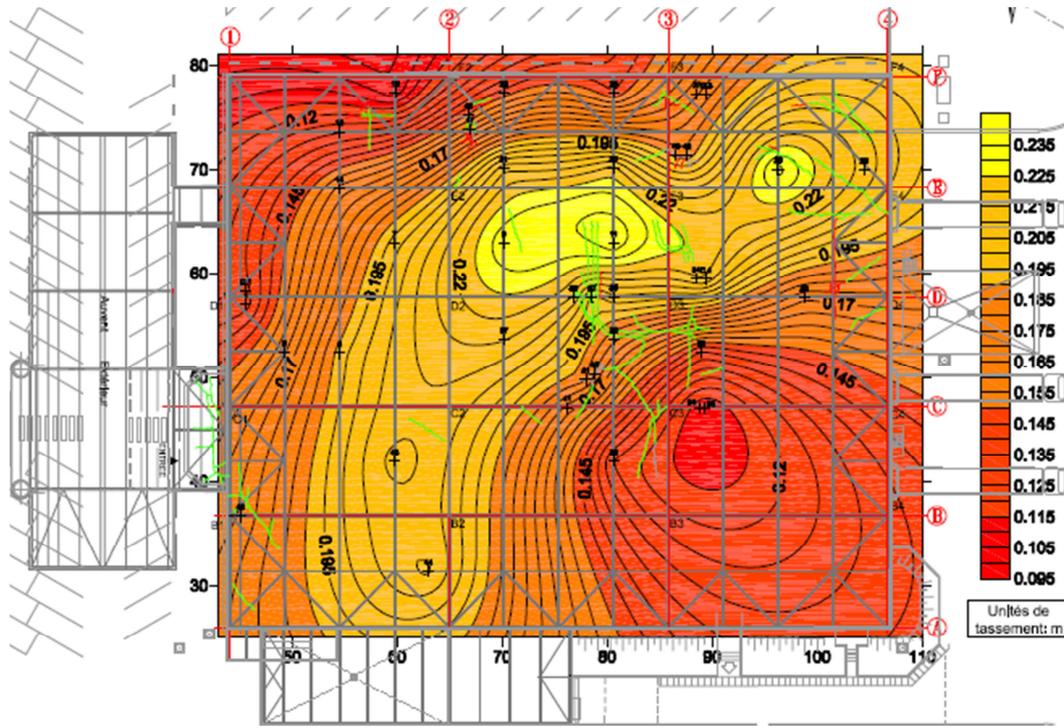


Figure 5 : Carte d'isovaleurs des tassements actuels mesurés sous le bâtiment

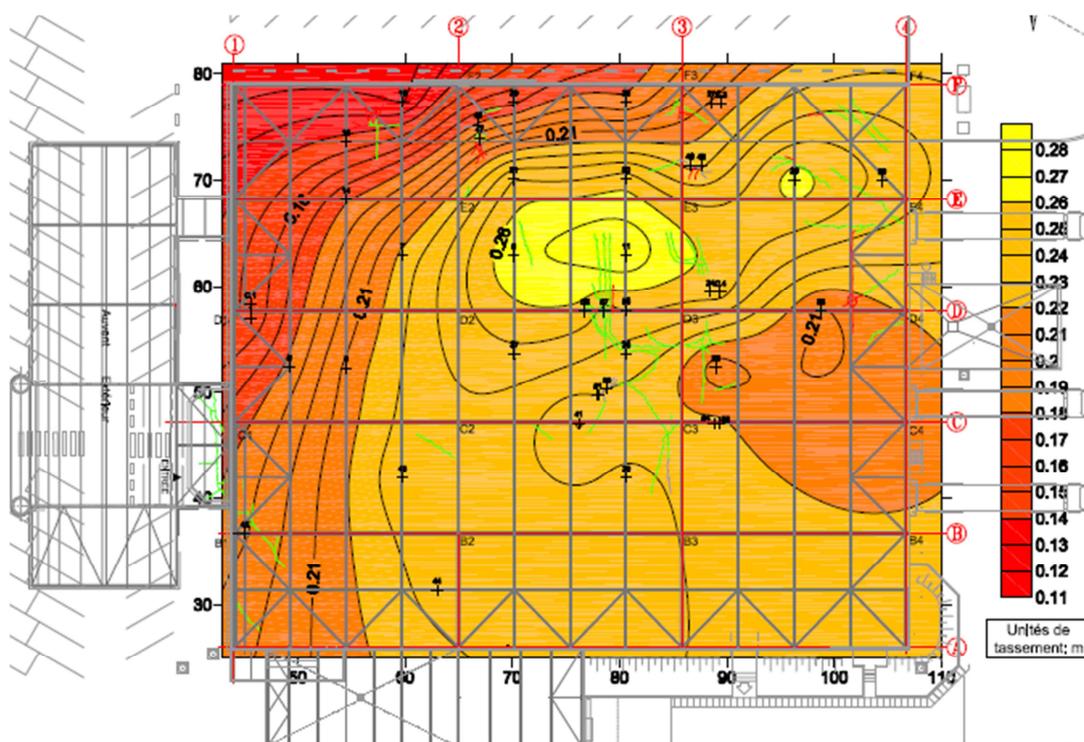


Figure 6 : Carte d'isovaleurs des tassements finaux estimés sous le bâtiment

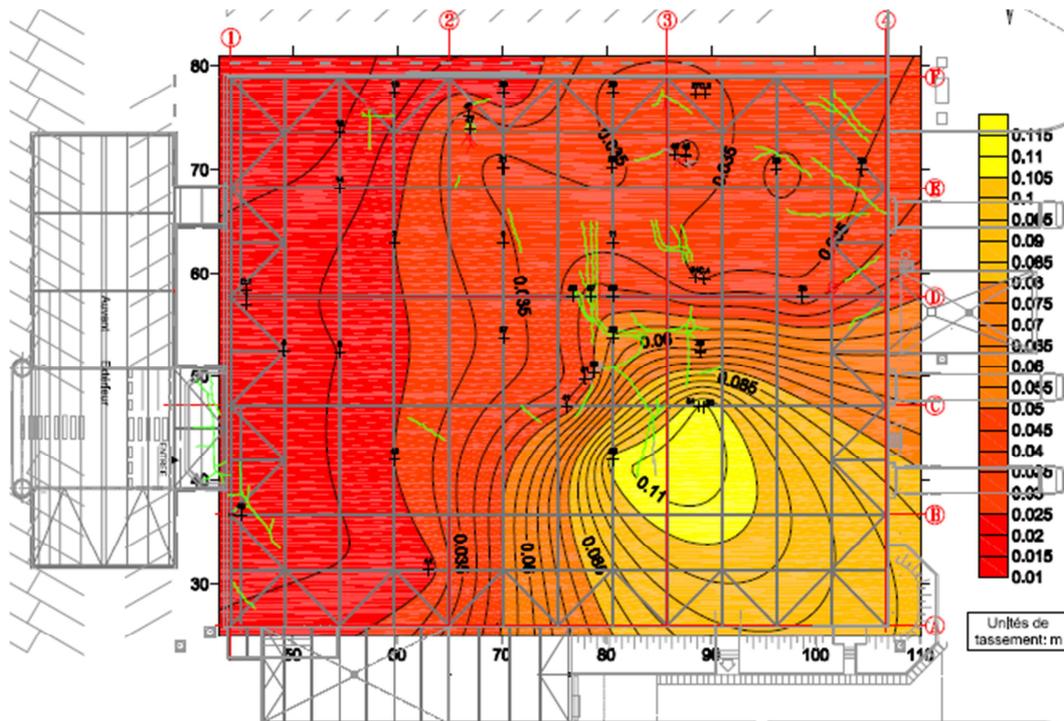


Figure 7 : Carte d'isovaleurs des tassements résiduels sous le bâtiment

Cette analyse permet la comparaison directe avec les déformations admissibles de la structure, dans le but de décider de l'application des actions correctives : recalage des équipements suite aux défauts de verticalité des racks à l'intérieur du bâtiment, relevage du dallage, renforcement des charpentes,...

3.2. Application à un remblai autoroutier

La réalisation d'un remblai autoroutier de 8,3 m de hauteur sur une couche compressible de 3,5 m d'épaisseur nécessite que soient connus les tassements résiduels afin de décider de la date du retrait du préchargement.

Les altitudes mesurées en fonction du temps, constituant des données factuelles, sont récapitulées dans le tableau 2.

Tableau 2 : Tassements mesurés au droit du remblai autoroutier

Date	08/04/2013	24/04/2013	25/04/2013	26/04/2013	29/04/2013	30/04/2013
Tassement (cm)	0,0	4,3	3,3	4,3	4,5	5,4
Date	06/05/2013	07/05/2013	13/05/2013	14/05/2013	15/05/2013	16/05/2013
Tassement (cm)	5,3	5,3	5,3	4,7	4,3	6,7
Date	17/05/2013	21/05/2013	22/05/2013	23/05/2013	24/05/2013	27/05/2013
Tassement (cm)	5,1	4,3	4,3	3,7	5,4	4,1
Date	29/05/2013	31/05/2013	03/06/2013	05/06/2013	07/06/2013	10/06/2013
Tassement (cm)	5,8	7,1	6,9	8,0	7,7	7,7
Date	12/06/2013	14/06/2013	17/06/2013	19/06/2013	21/06/2013	24/06/2013
Tassement (cm)	9,8	9,4	9,9	11,2	10,9	10,8
Date	26/06/2013	28/06/2013	01/07/2013	05/07/2013	08/07/2013	12/07/2013
Tassement (cm)	10,0	11,0	11,8	11,1	11,7	12,1

Dans le tableau 2, certaines mesures ne permettent pas d'établir une loi de consolidation fiable, car elles conduisent à des vitesses de tassements négatives. Ces mesures sont écartées de l'analyse, afin que les approximations au sens des moindres carrés puissent se faire sans donner de résultats aberrants.

En fonction des méthodes décrites ci-avant, les résultats donnés par le logiciel GEODEPL sont synthétisés sur la figure 8. La montée du remblai y est également présentée.

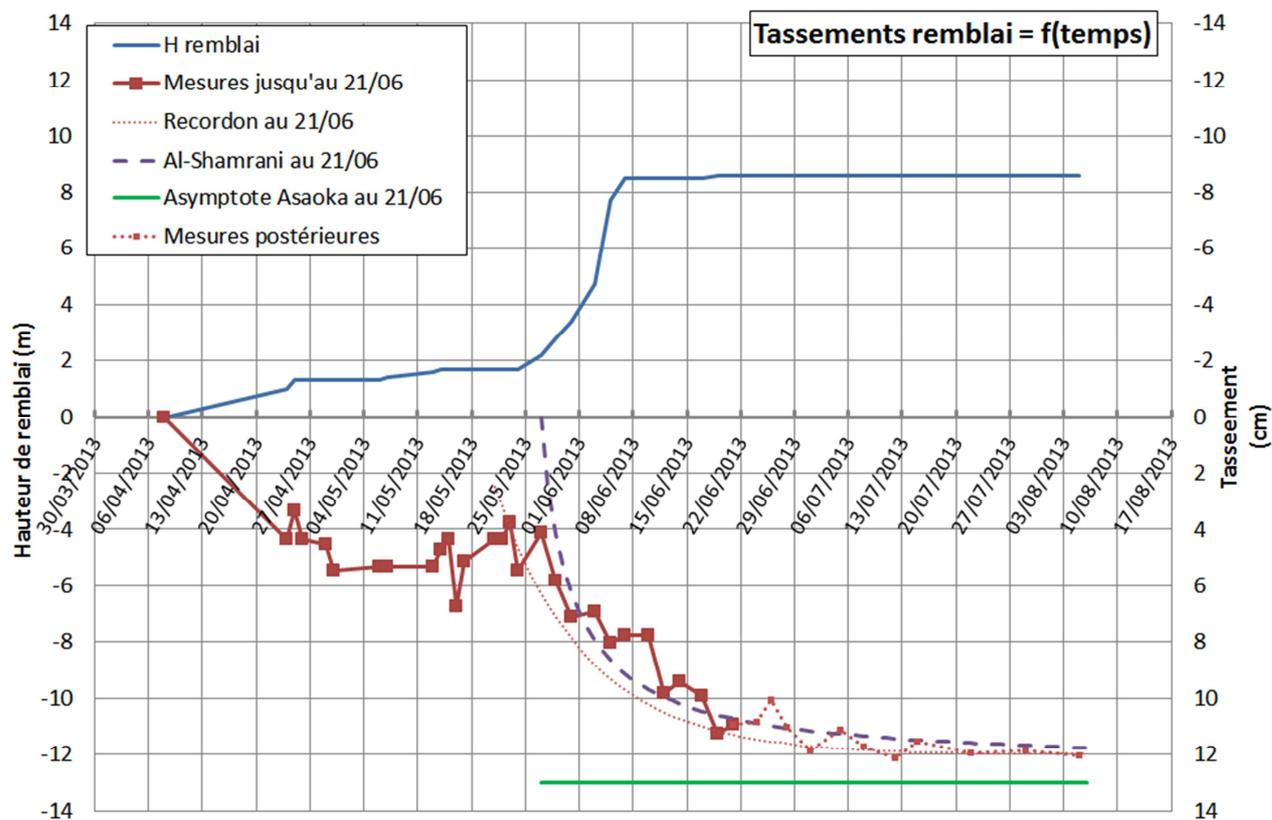


Figure 8 : Comparaison des méthodes - Tassements finaux estimés en fonction du temps (Remblai autoroutier)

Au vu de la convergence des méthodes de prévision, le point d'arrêt pouvait être levé dès le 21/06 puisque les tassements résiduels attendus, de l'ordre du centimètre, étaient acceptables. La seule lecture des tassements acquis n'aurait pourtant pas abouti aux mêmes conclusions, car les tassements avaient évolué de manière significative les semaines précédentes, consécutivement à la montée du remblai.

La poursuite des mesures au-delà de cette date a confirmé le choix de la levée, les tassements mesurés ayant rejoint l'asymptote des tassements prévus deux mois auparavant.

4. Conclusion

En conclusion, l'observation des tassements peut s'avérer être un complément intéressant pour affiner le modèle géotechnique établi au droit d'un ouvrage, définir les dispositions constructives initialement préconisées, décider du retrait de remblai de préchargement et préconiser le cas échéant la mise en œuvre de mesures complémentaires.

Le géotechnicien peut, directement en fonction des mesures, prédire quelles seront les amplitudes de tassements finales de consolidation, et à quelles dates celles-ci seront atteintes.

Il peut donc recalculer ses observations à l'approche de calcul qu'il a défini initialement ; sa modélisation se trouve renforcée si les différentes méthodes explicitées dans les paragraphes précédents convergent vers une même tendance.

Références bibliographiques

- A. Al-Shamrani Mosleh (2004). Applying the hyperbolic method and C_{α} / C_c concept for settlement prediction of complex organic-rich soil formations, *Engineering geology* 77 (2005) pp. 17-34.
- Baguelin F. (1999). La détermination des tassements finaux de consolidation : une alternative à la méthode d'Asaoka, *Revue Française de géotechnique* n°86, pp.9-17
- Magnan JP., Deroy JM. (1980). Analyse graphique des tassements observés sous les ouvrages, *Bulletin du LCPC* n°109, pp.45-52.
- Recordon E. (1988). Tassement des ouvrages au cours du temps - Méthode d'interprétation des mesures, *Ingénieurs et architectes suisses* n°7.