

GEO5

Méthode des éléments finis : Remblai - évolution temporelle du tassement (consolidation)

Résumé

L'objectif de ce manuel est de décrire l'utilisation du module Consolidation dans le cadre de la construction d'un remblai afin d'évaluer le tassement des sols au cours du temps.

Le fichier exemple correspondant est « Demo_manual_37.gmk ».

ATTENTION : Dans ce document, l'utilisateur sera guidé à travers toutes les étapes de définition et d'analyse d'un projet géotechnique, dans un contexte établi par l'auteur. L'utilisateur doit être informé que les réglages de l'analyse (onglet « Paramètres ») sont de sa responsabilité et doivent être vérifiés/adaptés avant de commencer tout nouveau projet.

1 Introduction

Cet exemple illustre l'application du module Consolidation du programme GEO5-FEM dans le cadre de l'analyse l'évolution temporelle des tassements provoqués par la construction d'un remblai. L'objectif est de déterminer l'évolution de la déformation du remblai et du sous-sol provoquée par la redistribution progressive de la pression interstitielle. Le résultat de l'analyse est le champ de déplacement et le champ de pression interstitielle à des moments choisis après l'installation du remblai.

2 Projet

Le sous-sol est constitué d'un sol sableux recouvert d'une couche de 4,5 m d'épaisseur de sol argileux. La section transversale du remblai a une forme trapézoïdale, mesurant 20 m de largeur à la base, 8,5 m de largeur au sommet et 4 m de hauteur.

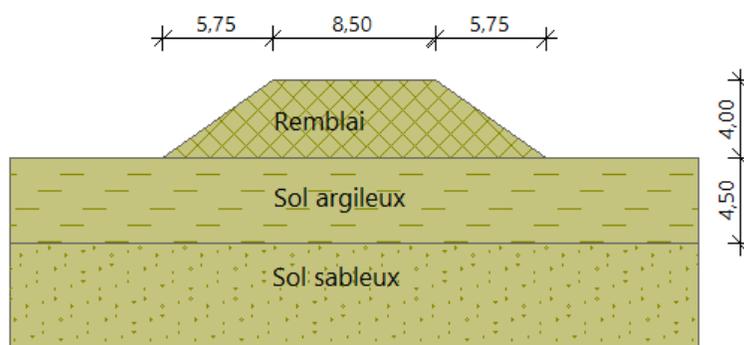


FIGURE 1 – Géométrie de la structure

Le modèle de matériau de Mohr-Coulomb sera utilisé pour représenter le comportement du sous-sol et du remblai. Les paramètres du modèle (le poids propre γ , le module de Young E , le coefficient de Poisson ν , l'angle de frottement interne φ et la cohésion c) sont donnés dans le tableau ci-dessous. Le paramètre $k_{x,sat}$ (resp. $k_{y,sat}$) représente le coefficient de perméabilité horizontal (resp. vertical) d'un sol complètement saturé. Il convient de noter que la solution numérique mise en œuvre repose sur l'hypothèse d'un sol totalement saturé. Les valeurs indicatives du coefficient de perméabilité pour les sols sélectionnés sont disponibles dans l'aide en ligne du programme GEO5 FEM ici.

Paramètres de sol	Sol argileux	Sol sableux	Remblai
γ [kN/m ³]	18,5	19,5	20
E [MPa]	10	30	30
ν	0,4	0,3	0,3
φ [°]	28	33	30
c [kPa]	15	2	10
$k_{x,sat}$ [m/j]	10^{-5}	10^{-2}	10^{-2}
$k_{y,sat}$ [m/j]	10^{-5}	10^{-2}	10^{-2}

TABLE 1 – Tableau des paramètres des sols

La nappe phréatique initiale en régime permanent se trouve à 1 m sous le terrain. Notre objectif est de trouver le champ de déplacement et la pression interstitielle 7 jours, 30 jours, 1 an et 10 ans après la construction du remblai.

3 Solution

Les paramétrages du projet, la géométrie et les paramètres des sols sont valorisés dans le mode de topologie. Le maillage par éléments finis est également généré dans ce mode. Les conditions aux limites et la construction du remblai sont introduites dans les étapes de calcul 1 à 5.

3.1 Topologie

3.1.1 Paramétrage du problème

Dans le cadre « Paramètres », nous allons sélectionner l'option « Consolidation » comme type de calcul, et « Plan » comme type de géométrie.

Remarque : pour permettre la visualisation de toutes les variables calculées, il convient de cocher l'option « Résultats détaillés ». Ainsi, le programme peut tracer non seulement les déplacements, les pressions interstitielles et les vitesses d'écoulement, mais aussi les valeurs des composantes de contrainte et de déformation et leurs invariants.

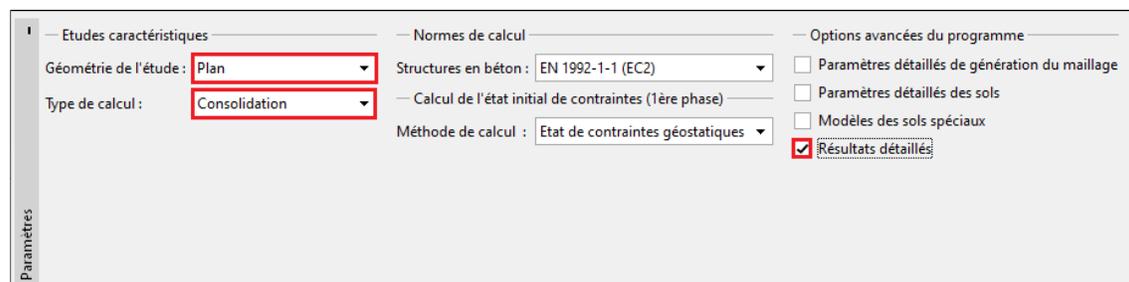


FIGURE 2 – Cadre « Paramètres »

3.1.2 Géométrie du modèle

Les dimensions du modèle et les interfaces entre les sols sont saisies dans le cadre « Interface » du mode « Topologie ». Horizontalement, le modèle s'étale de -30 à 30 m et se compose de trois interfaces. La première interface localise le terrain d'origine. Dans cet exemple, elle est définie par des points de coordonnées $(-30; 0)$, $(-10; 0)$, $(10; 0)$ et $(30; 0)$. La deuxième interface sépare les deux couches du sous-sol, elle est définie par les points $(-30; -4, 5)$ et $(30; -4, 5)$. La troisième interface définit la forme du remblai par des points de coordonnées $(-10; 0)$, $(-4, 25; 4)$, $(4, 25; 4)$ et $(10; 0)$. Enfin, nous allons définir, dans le fenêtré de dialogue « Dimensionnement de l'espace de travail », la profondeur du modèle sous l'interface la plus basse à $5,5$ m.

3.1.3 Matériau

L'analyse de consolidation est un problème couplé contrôlé à la fois par les lois mécaniques et hydrauliques. Pour cette raison, il convient de saisir à la fois les paramètres matériels utilisés pour l'analyse de contrainte standard et les paramètres utilisés pour l'analyse d'écoulement. Les paramètres matériels sont saisis dans le cadre « Sols ». Ici, nous allons créer trois matériaux adoptant le modèle de matériau de Mohr-Coulomb et attribuer les valeurs du tableau de la section « Projet » aux paramètres du modèle. Nous considérons un angle de dilatance ψ nul pour tous les matériaux. Une fois créés, les matériaux sont affectés à leurs régions dans le cadre « Assignation ».

3.1.4 Maillage par éléments finis

Compte tenu de l'étendue horizontale assez grande du modèle, il est raisonnable de créer un maillage ayant des éléments plus grands près des limites du modèle où des déformations significatives ne sont pas attendues. Dans le cadre « Raffinement des lignes », nous allons choisir les limites verticales et définir la taille de l'élément à 2 m pour un rayon de 20 m. De même, nous allons définir

la longueur de l'élément à 2 m et le rayon à 6 m à la limite inférieure. Enfin, dans le cadre « Générer le maillage », nous allons fixer la longueur de l'arête de l'élément à 1 m et générer le maillage. Le maillage d'éléments finis résultant est affiché dans la figure suivante.

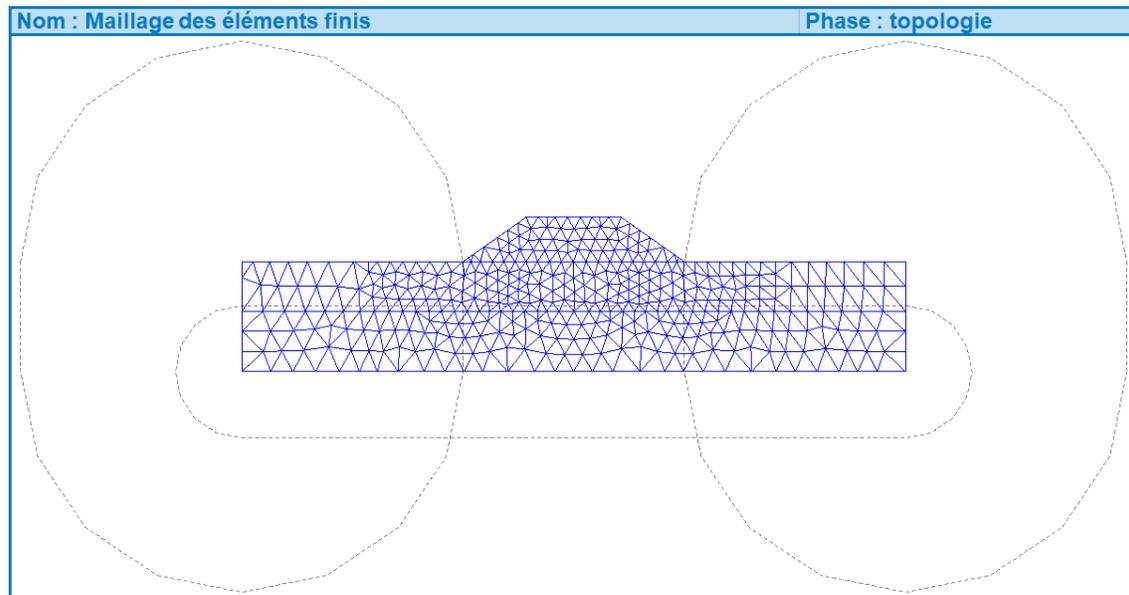


FIGURE 3 – Maillage d'éléments finis « dilué » le long des limites latérales et inférieures

3.2 Étape de calcul 1 : contraintes géostatiques primaires

La première étape de calcul définit la contrainte géostatique initiale et la distribution initiale de la pression interstitielle. Seul le domaine du sous-sol est actif à ce stade tandis que le remblai est inactif. Ceci est défini dans le cadre « Mise en tension ». Ensuite, nous allons vérifier, dans le cadre « Assignment », que les domaines reçoivent le bon matériau. La nappe phréatique initiale est définie dans le cadre « Eau ». Ici, la nappe phréatique est introduite en saisissant deux points de coordonnées $(-30; -1)$ et $(-30; -1)$. Les conditions aux limites sont définies dans le cadre « Appuis linéiques », nous allons cocher l'option « Générer automatiquement les appuis linéiques aux limites » pour obtenir les appuis suivants.

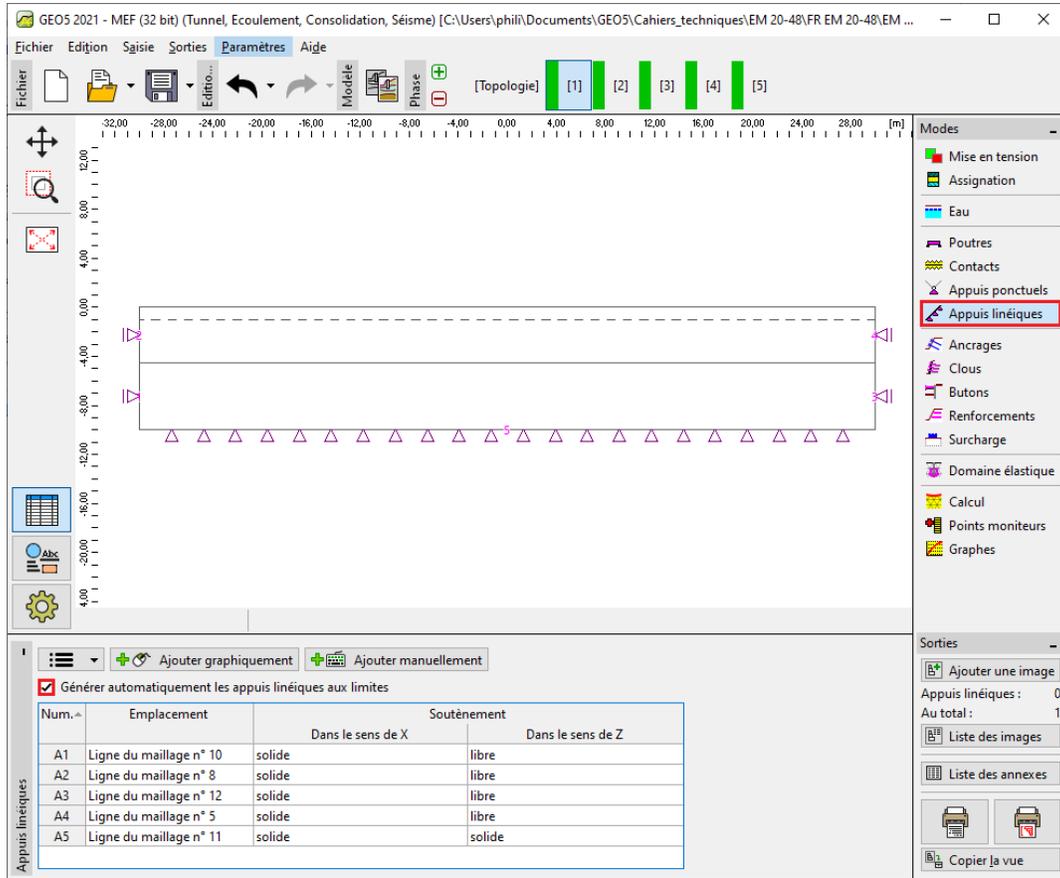


FIGURE 4 – Appuis linéaires générés automatiquement sur les limites du modèle

Enfin, nous allons soumettre le calcul (dans le cadre de même nom), ce qui nous permet d'obtenir la distribution de la pression interstitielle (cf. figure ci-dessous). Comme d'habitude, les déplacements sont initialisés à zéro.

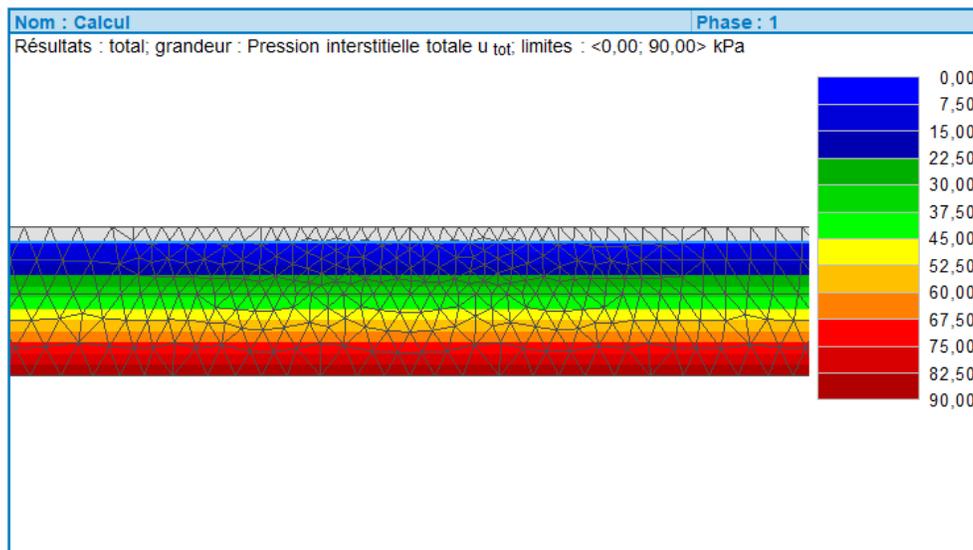


FIGURE 5 – Distribution initiale de la pression interstitielle

3.3 Étape de calcul 2 : mise en place du remblai et analyse du tassement

Dans la deuxième étape de calcul, nous allons simuler la construction du remblai en activant son domaine dans le cadre « Mise en tension ». Contrairement à la première étape, où seule l'analyse mécanique a eu lieu, la deuxième étape nécessite déjà de définir les limites hydrauliques. Celles-ci sont introduites dans le cadre « Ligne - Écoulement ». Ici, nous allons sélectionner les conditions aux limites perméables sur toutes les frontières car rien n'empêche l'eau souterraine de s'écouler dans et hors du domaine définissant le modèle. Dans le cadre « Calcul », nous allons fixer la durée de l'étape à 7 jours et soumettre le calcul. Les répartitions résultantes du tassement vertical et de la pression interstitielle sont restituées sur les deux figures suivantes.

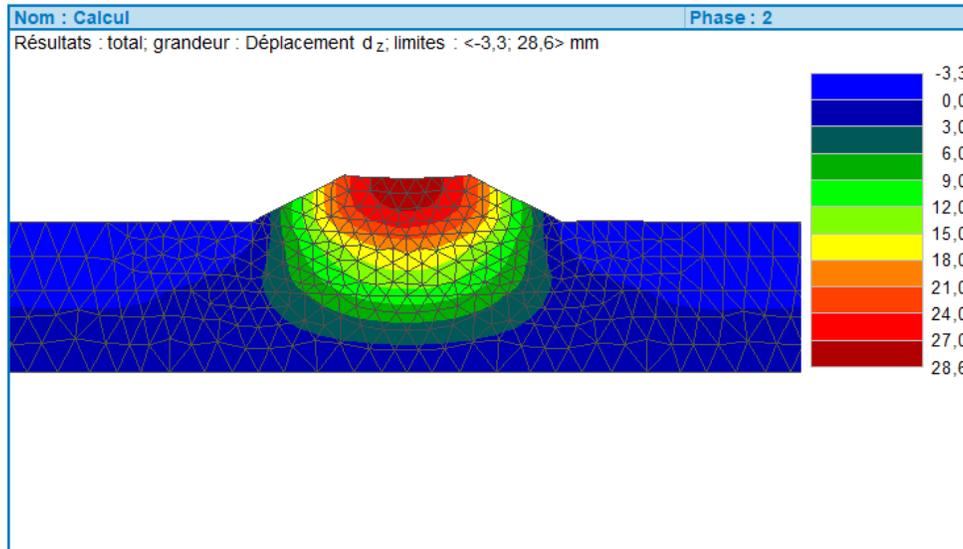


FIGURE 6 – Distribution des déplacements verticaux (tassements) 7 jours après la construction du remblai tracé sur un maillage déformé

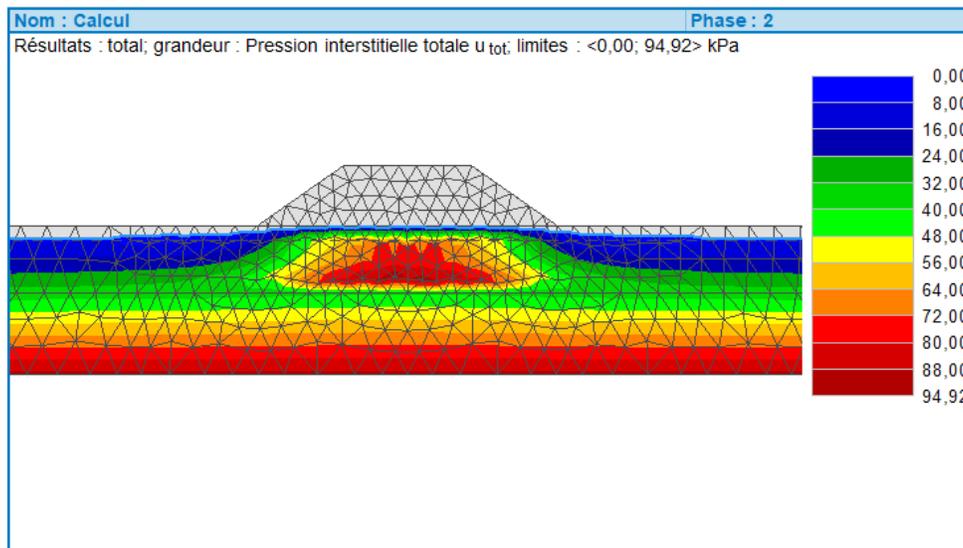


FIGURE 7 – Distribution de la pression interstitielle 7 jours après la construction du remblai tracée sur un maillage non déformé

Nous constatons que la pression interstitielle sous le remblai a augmenté. Cette pression interstitielle accrue aide à supporter l'augmentation de la contrainte verticale causée par la construction du remblai. L'augmentation de la pression interstitielle sera redistribuée dans les étapes suivantes, provoquant un tassement additionnel sans modification de la charge verticale causée par l'installation du remblai.

3.4 Étapes de calcul 3 à 5 : calcul des tassements successifs

Dans les étapes 3, 4 et 5, nous allons calculer les distributions des déplacements et des pressions interstitielles aux temps 30 jours, 365 jours et 3650 jours après la mise en place du remblai. La géométrie, le matériau et le chargement restant inchangés et nous allons donc conserver tous les paramètres fixés à l'étape 2. Avant de lancer le calcul, nous allons spécifier la durée de chaque étapes. La durée des étapes s'additionnant, nous allons donc fixer la durée de l'étape 3 à 23 jours, la 4 à 335 jours et la 5 à 3285 jours. L'évolution résultante du tassement et de la pression interstitielle est représentée sur les figures suivantes.

3.4.1 Évolution du tassement

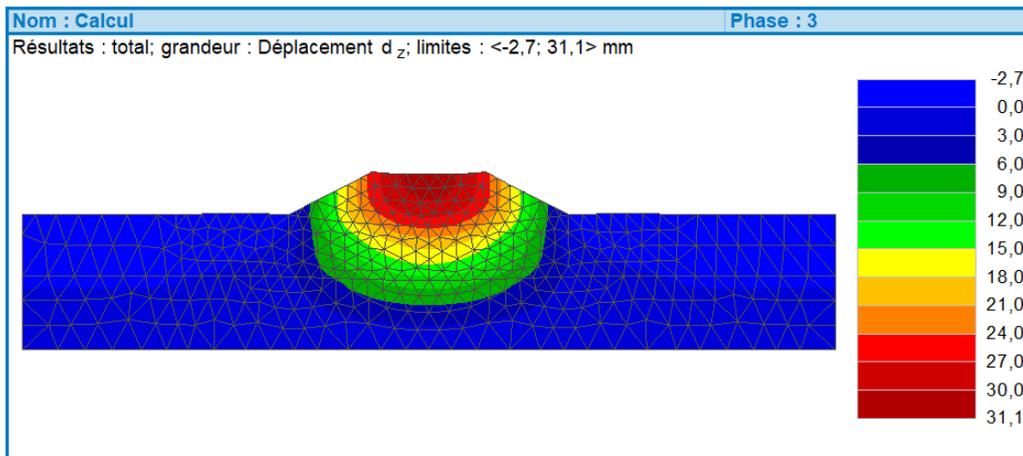


FIGURE 8 – Distribution des déplacements verticaux (tassements) 30 jours après la construction du remblai tracé sur un maillage déformé

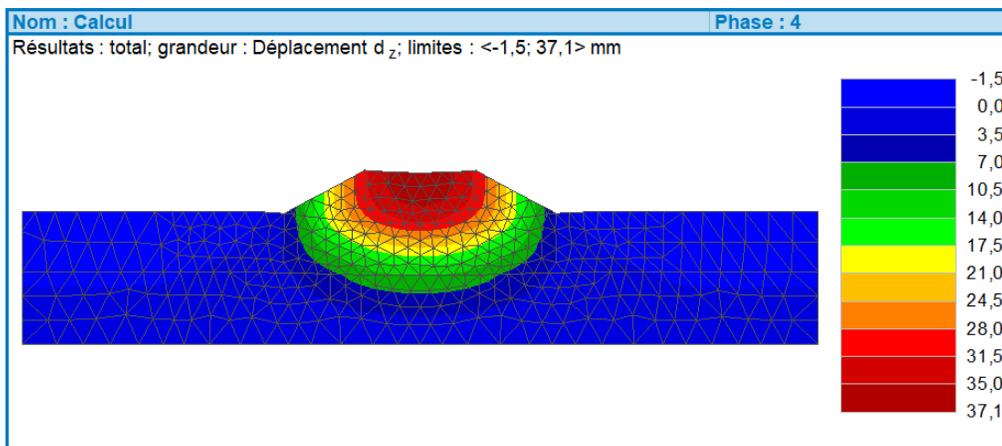


FIGURE 9 – Distribution des déplacements verticaux (tassements) 1 an après la construction du remblai tracé sur un maillage déformé

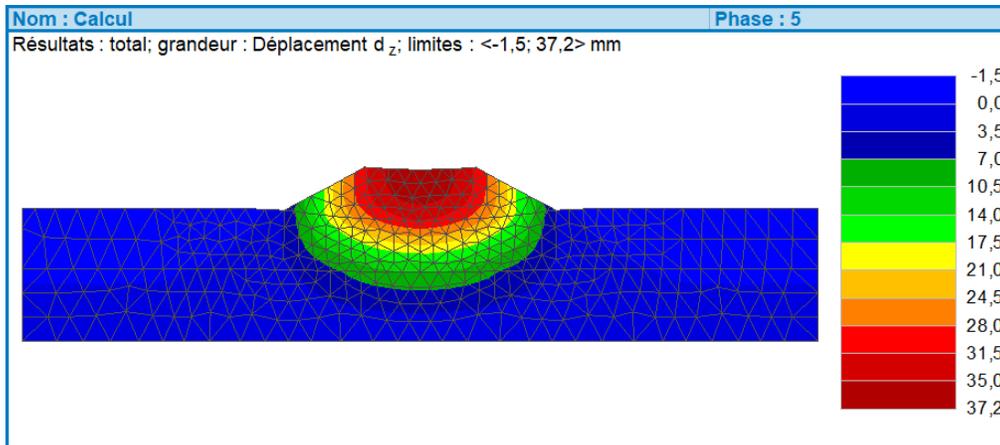


FIGURE 10 – Distribution des déplacements verticaux (tassements) 10 ans après la construction du remblai tracé sur un maillage déformé

3.4.2 Évolution de la pression interstitielle

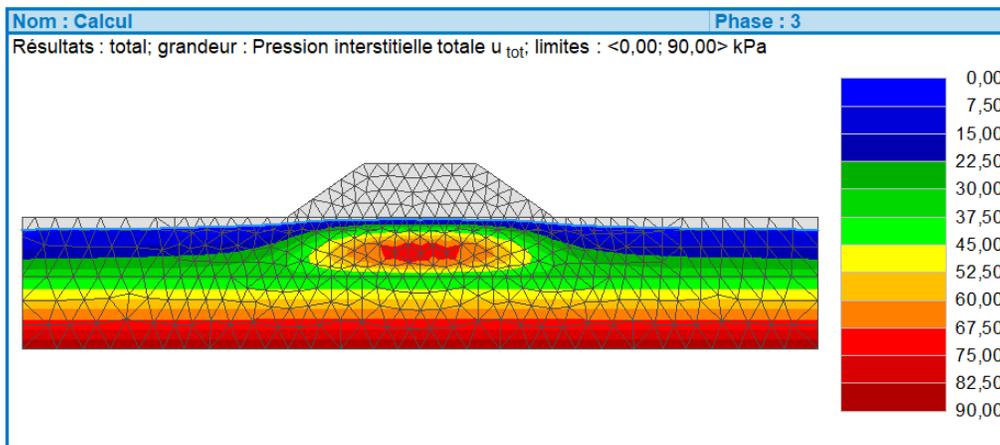


FIGURE 11 – Distribution de la pression interstitielle 30 jours après la construction du remblai tracée sur un maillage non déformé

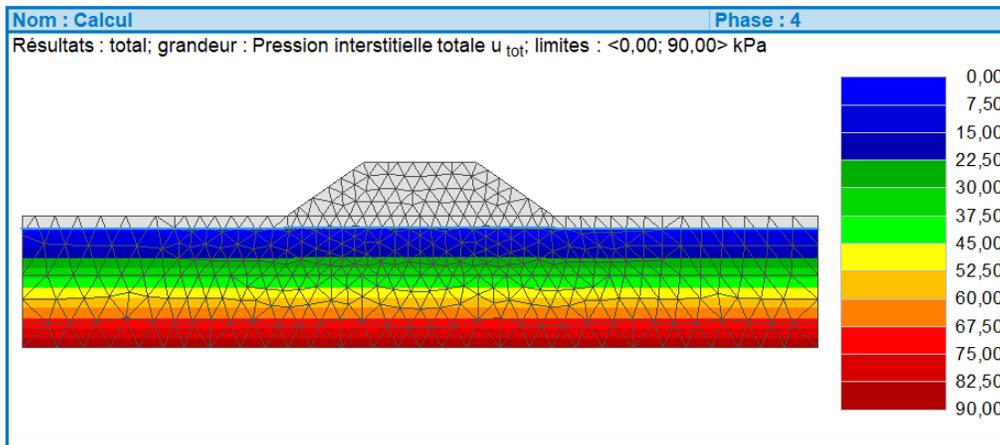


FIGURE 12 – Distribution de la pression interstitielle 1 an après la construction du remblai tracée sur un maillage non déformé

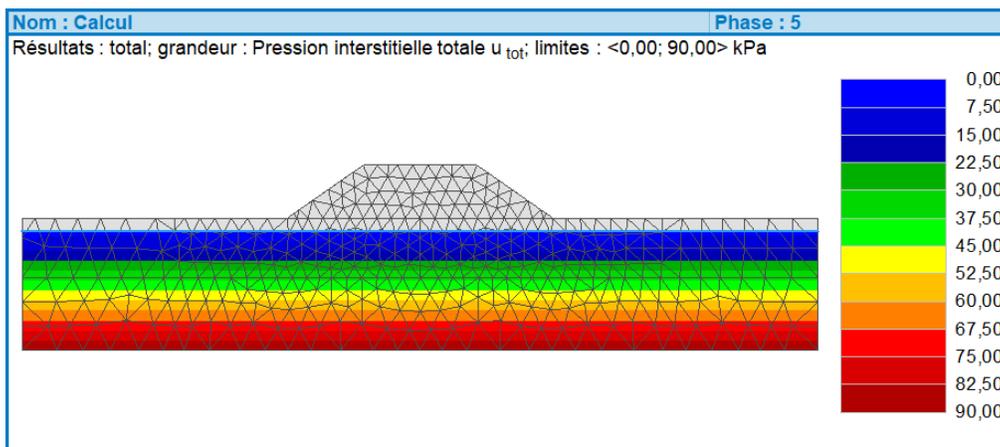


FIGURE 13 – Distribution de la pression interstitielle 10 ans après la construction du remblai tracée sur un maillage non déformé

4 Conclusion

Les résultats obtenus aux étapes 2 à 5 suggèrent que la dissipation de la pression interstitielle a lieu essentiellement au cours de la première semaine après la construction du remblai. Les valeurs maximales du tassement du remblai sont répertoriées dans le tableau ci-dessous.

Temps	7 jours	30 jours	1 an	10 ans
Tassement	28,6 mm	31,1 mm	37,1 mm	37,2 mm

TABLE 2 – Tassement au cours du temps

D'après la distribution de la pression interstitielle, il est clair qu'un an après la construction du remblai, la nappe phréatique retrouve son niveau initial. La dissipation de la pression interstitielle s'étant déjà produite, le tassement peut donc être considéré comme définitif.