

GEO5

Méthode des éléments finis : Digue en terre - Modélisation numérique des infiltrations en régime permanent

Résumé

L'objectif de ce manuel est de décrire la modélisation numérique des infiltrations dans un barrage en terre en régime permanent en utilisant la méthode des éléments finis.

Le fichier exemple correspondant est « Demo_manual_32.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 une application du module Écoulement du programme GEO5-MEF dans le cadre de l'analyse des infiltrations à travers une digue en terre homogène. L'objectif est de localiser une nappe phréatique (ligne phréatique) à l'intérieur du barrage. Ce problème entre dans la catégorie des écoulements d'eau non confinée. L'étude impose de spécifier la géométrie de la digue, les propriétés des matériaux du sol et les conditions aux limites hydrauliques. L'analyse fournit l'emplacement de la nappe phréatique dans le corps de la digue, la distribution des pressions interstitielles sous la nappe phréatique et la distribution des vitesses d'écoulement de l'eau. Au-dessus de la nappe phréatique, le programme permet également de tracer les pressions interstitielles négatives (suction). Le débit total à travers les limites perméables est également calculé.

2 Projet

La hauteur de la digue est fixée à 11 m, la longueur projetée le long de la face amont et aval est supposée égale à 24 m et la crête de la digue est fixée à 4 m. Le sous-sol imperméable se trouve à 4 m sous la surface du terrain et la nappe phréatique à la face aval se trouve à 1 m sous la surface du terrain. Le sol dans tout le domaine est considéré comme homogène et isotrope avec les mêmes propriétés hydrauliques dans le sens vertical et horizontal. Le sol choisi a été classé comme limon sableux selon le système de classification USDA.

Le but de l'étude est de déterminer l'emplacement de la ligne phréatique en considérant le niveau d'eau dans le réservoir à respectivement 2 m, 9 m et 10,8 m au-dessus de la surface du terrain. De plus, il conviendra d'également vérifier si le rejet d'eau au pied de la face aval se produit.

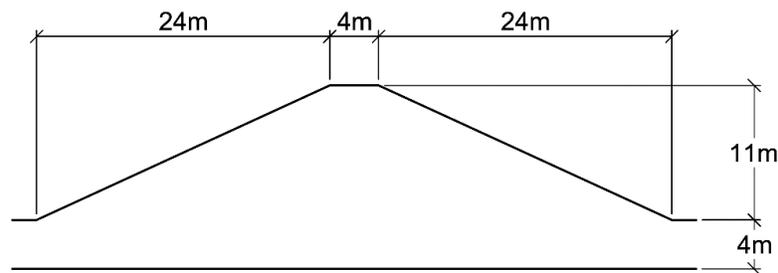


FIGURE 1 – Coupe transversale de la digue en terre homogène - détails géométriques

3 Solution

Nous allons utiliser le programme GEO5-MEF pour réaliser cette analyse. La résolution de ce problème étape par étape va suivre le plan suivant :

1. Topologie : paramétrage de base du projet, géométrie du modèle, paramètres du matériau et génération du maillage
2. Phases de calcul 1, 2 et 3 : introduction des différentes conditions hydrauliques aux limites
3. Conclusion.

3.1 Topologie

Paramétrage du problème

Dans le cadre « Paramètres », nous allons choisir « Plan » comme le type de géométrie et « Écoulement permanent » comme type de calcul.

Remarque : pour permettre la visualisation de toutes les variables calculées, nous allons également cocher l'option « Résultats détaillés », ce qui permettra d'afficher, en plus des pressions interstitielles et des vitesses d'écoulement, les valeurs du coefficient de perméabilité relative caractérisant la perméabilité dans la zone non saturée au-dessus de la ligne phréatique.

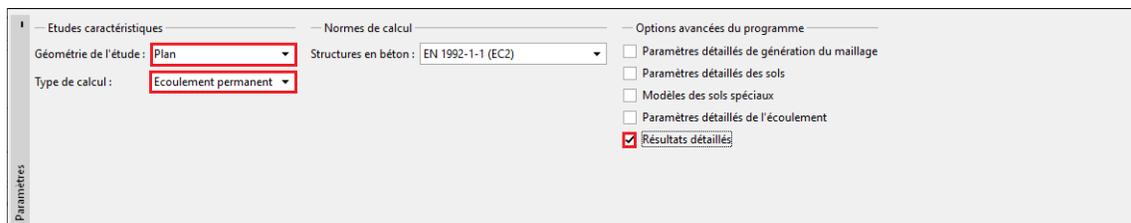


FIGURE 2 – Cadre « Paramètres »

Géométrie du modèle

Pour créer le modèle, il suffit de valoriser les dimensions de l'espace de travail de 0 à 52 met la profondeur du modèle à 4 m, et de saisir une interface en utilisant les points de coordonnées : (0; 0), (24; 11), (28; 11) et (52; 0).

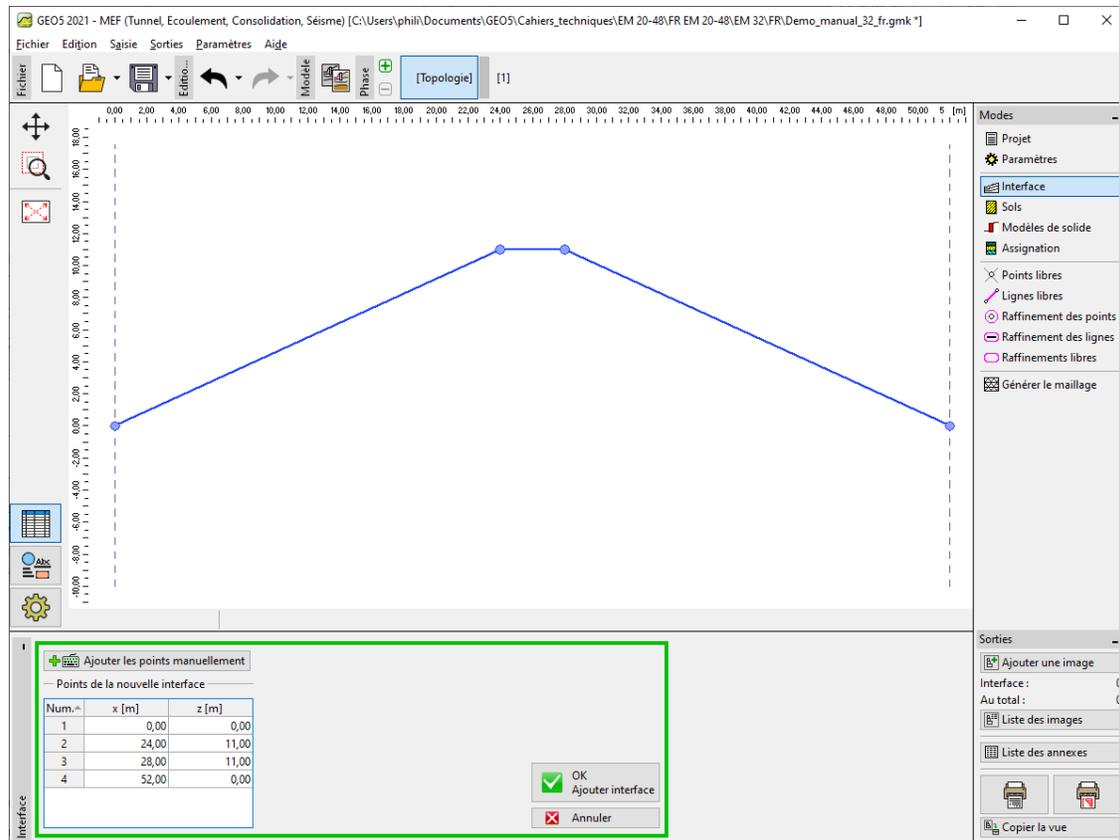


FIGURE 3 – Cadre « Interface »

Matériau

Les paramètres matériels requis du sol doivent être fournis par des mesures en laboratoire. Cependant, pour cet exemple, ces mesures n'étaient pas disponibles. Par conséquent, nous avons adopté des valeurs approchées correspondant au limon sableux.

Si vous choisissez le modèle de van Genuchten, les valeurs usuelles des paramètres correspondant au limon sableux sont : $k_{x,sat} = k_{y,sat} = 1,06 \text{ m/jour}$, $\alpha = 7,5$ et $n = 1,89$. L'indice des vides associé à ce type de sol est : $e_0 = 0,7$. Pour plus de détails, consultez l'Aide-F1.

FIGURE 4 – Les paramètres du matériau sont spécifiés dans le cadre « Ajouter des nouveaux sols »

Remarques :

1. la perméabilité du sol dans le sol non saturé ou partiellement saturé au-dessus de la ligne phréatique est exprimée par le produit du coefficient de perméabilité dans un sol entièrement saturé K_{sat} et du coefficient de perméabilité relative K_r , dont la valeur est déterminée par le modèle dit de couche de transition Ce modèle définit la dépendance entre le coefficient de perméabilité relative K_r à la hauteur de pression (pression interstitielle) h_p . La figure suivante montre l'évolution de cette dépendance pour le modèle log-linéaire de la couche de transition et le modèle de van Genuchten.

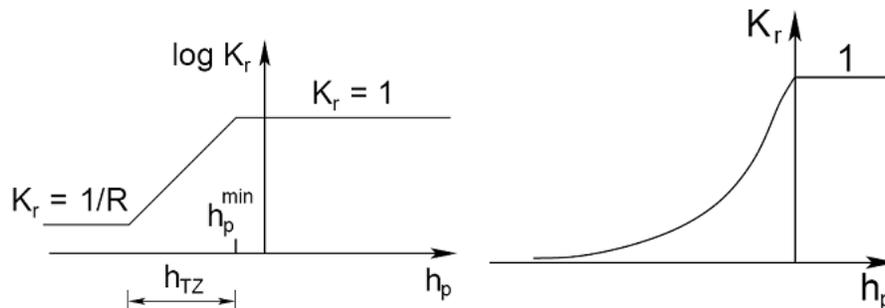


FIGURE 5 – Évolution du coefficient de perméabilité en fonction de la hauteur de pression pour les modèles log-linéaire et de van Genuchten de couche de transition

2. on peut voir sur la figure que pour une hauteur de pression positive - c'est-à-dire la zone sous le niveau de la ligne phréatique - le coefficient de perméabilité relative est toujours constant

et égal à un. L'écoulement dans la zone sous le niveau de la nappe phréatique n'est donc pas affecté par le choix du modèle de couche de transition. Dans une zone pour laquelle la hauteur de pression est négative (au-dessus du niveau des eaux souterraines), le degré de saturation du sol diminue. La raison de cette diminution provient du fait que seule la partie saturée des pores participe à la conduction des eaux souterraines, et donc le coefficient de perméabilité relative diminue également avec la diminution du degré de saturation.

Maillage par éléments finis

L'analyse utilise des éléments triangulaires à 3 nœuds comme option par défaut dans le programme GEO5-FEM Écoulement. Pour la géométrie de la digue, une longueur d'arête de 1 m est appropriée. Du fait de l'homogénéité de la digue, aucun raffinement de maillage n'est nécessaire.

Remarques :

1. le raffinement du maillage devient important si un modèle géométrique plus détaillé contenant des éléments structuraux relativement petits (par ex. des joints ou des drains) est à considérer
2. l'option « Paramètres détaillés de génération du maillage » (du cadre « Paramètres ») permet de créer des maillages hybrides (combinaison d'éléments triangulaires et quadrangulaires).

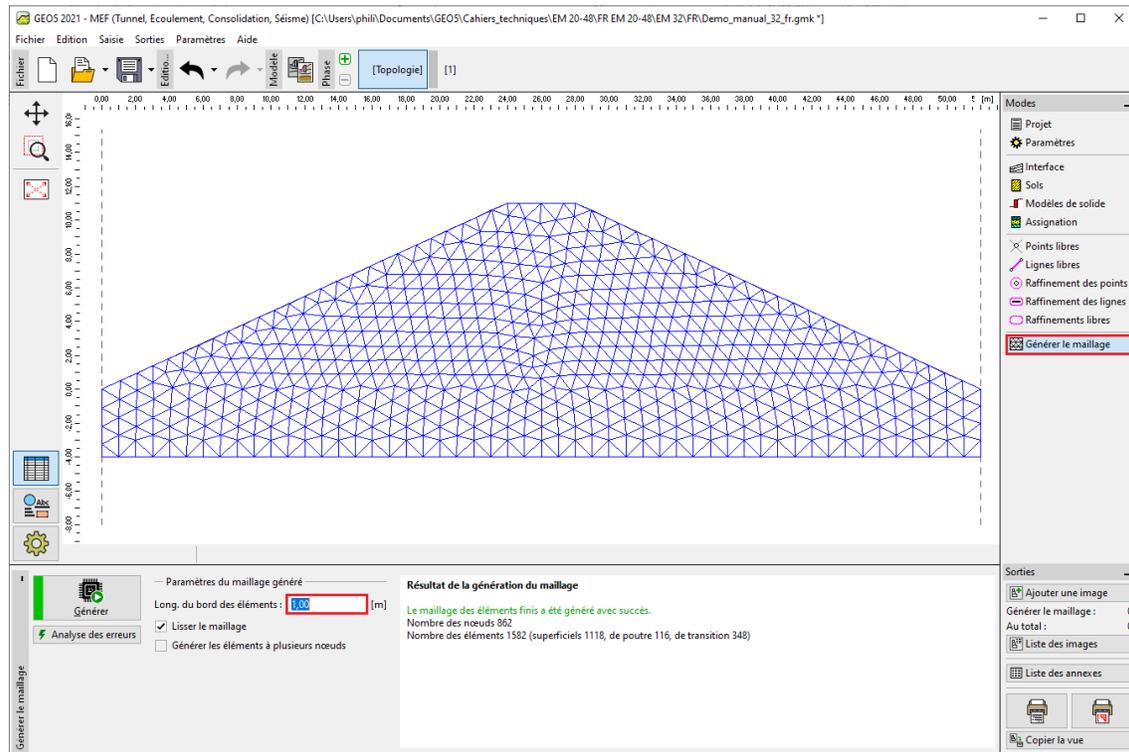


FIGURE 6 – Maillage d'éléments finis

3.2 Phase de calcul 1 : niveau d'eau à 2 m au dessus du terrain en amont de la digue

Pour chaque phase de calcul, il convient de saisir les conditions aux limites hydrauliques avant de démarrer le calcul. Ces conditions aux limites sont appelées dans le programme « écoulement ponctuel » (resp. « écoulement linéique ») associé au cadre « Points - Écoulement » (resp. « Lignes - Écoulement »).

Remarque : par défaut, toutes les limites externes sont considérées comme imperméables. Le cal-

cul - l'analyse par éléments finis - nécessite donc de fixer des pressions interstitielles soit le long d'une portion de la frontière externe (lignes ou points sur la frontière externe), soit à des points à l'intérieur du domaine.

Conditions aux limites

Pour cette phase, nous allons définir les conditions aux limites suivantes :

- sur la face amont (ligne n° 2), nous prenons « pression interstitielle » comme type de frontière et fixons le niveau d'eau au-dessus de la surface du terrain. La surface située au-dessus du niveau d'eau est considérée comme imperméable. La succion le long de la ligne, où la condition aux limites de pression interstitielle est spécifiée, n'est pas fixée mais est plutôt déterminée par le calcul
- sur la face aval (ligne n° 6), le type de frontière est fixé à « de drainage » (suintement)
- une condition de type « pression interstitielle » avec une hauteur de niveau d'eau -1 m est définie sur la limite verticale au pied de la face aval (ligne n° 5). Cette condition suggère un écoulement d'eau confiné avec une nappe phréatique à ce niveau particulier
- À la limite inférieure du domaine et le long de la crête de la digue (lignes n° 1 et 4), choisissons le type de frontière « imperméable ». Cette condition aux limites ne suggère aucun écoulement à travers la frontière.

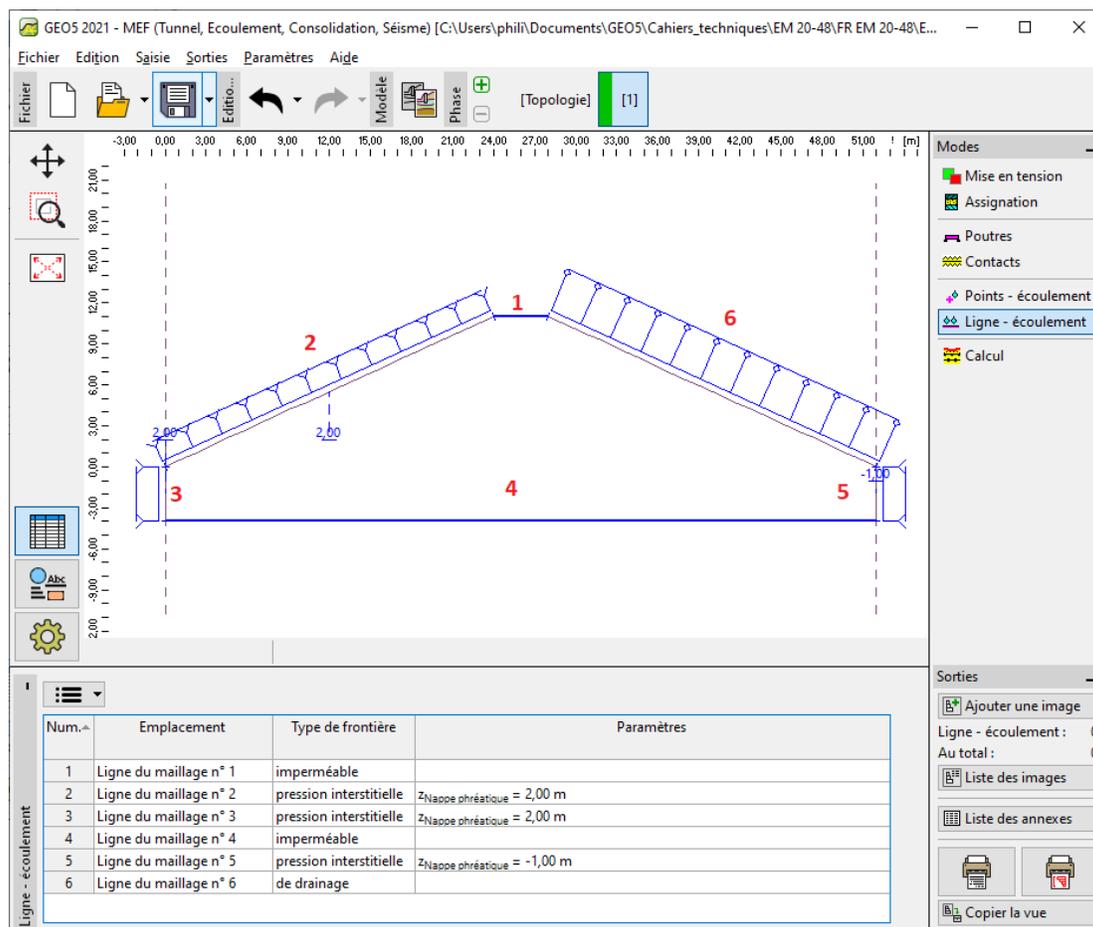


FIGURE 7 – Cadre « Ligne - Écoulement » - Spécification des écoulements linéiques (conditions aux limites)

Remarque : le type de condition aux limites de suintement est utilisé le long de segments de limites externes où l'on ne sait pas a priori si la limite sera située au-dessus ou au-dessous de la nappe

phréatique. La condition aux limites de suintement déclenche une recherche automatique d'un point de décharge (sortie - un point sur la surface de suintement traversé par la ligne phréatique) et définit les conditions aux limites appropriées en dessous (pression interstitielle nulle) et au-dessus (flux nul) de ce point. Cette condition ne doit être envisagée qu'à une frontière où une sortie d'eau libre peut avoir lieu.

Résultats

Cocher de l'option « Résultats détaillés » (du cadre « Calcul ») permet de visualiser la distribution de la pression interstitielle, les composantes horizontales et verticales du vecteur de vitesse d'écoulement de l'eau et la hauteur hydraulique globale sous la nappe phréatique.

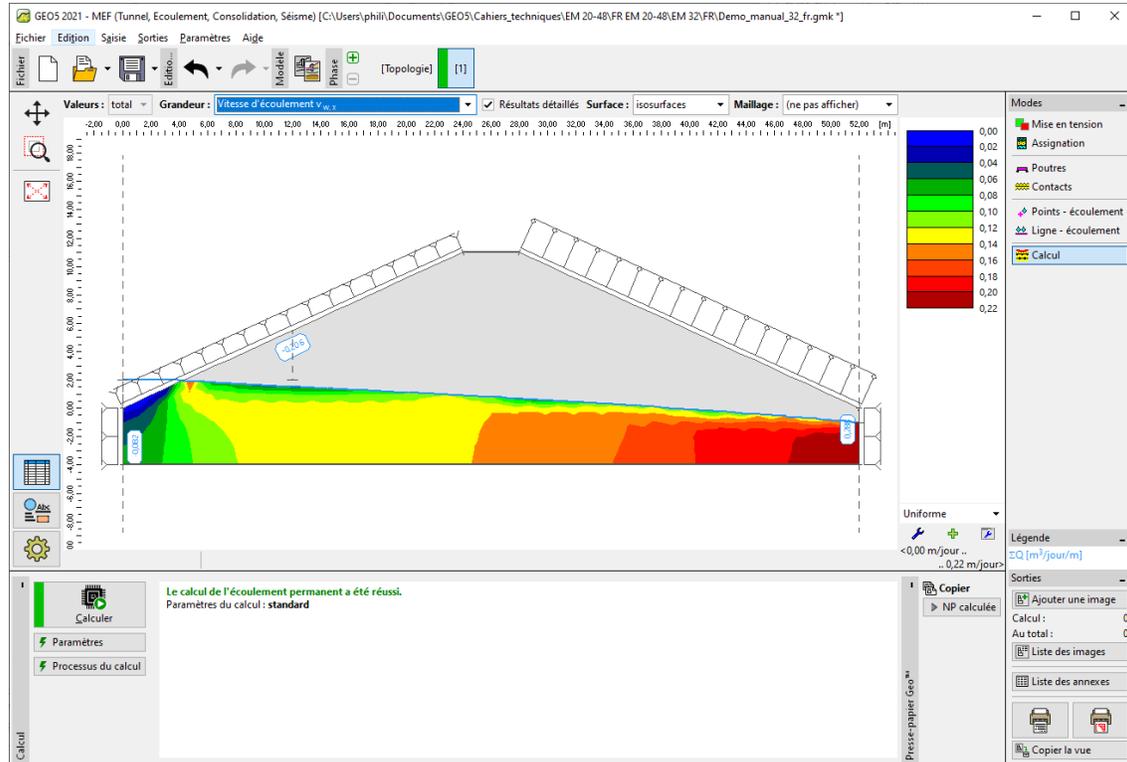


FIGURE 8 – Distribution de la composante horizontale de la vitesse d'écoulement de l'eau - Phase 1

Le programme permet également d'afficher le flux total sur des segments particuliers où l'écoulement d'eau a lieu. Un signe négatif représente l'afflux d'eau dans le modèle tandis qu'un signe positif correspond à l'écoulement de l'eau hors du domaine. Il ressort clairement de la figure que l'eau pénètre dans le domaine en face amont et sort du domaine en dessous du pied de la digue uniquement. Les valeurs de flux sont prises par longueur de 1 m de barrage mesurées dans la direction hors plan.

La figure ci-dessous montre clairement qu'au-dessus de la ligne phréatique, le coefficient de perméabilité relative diminue rapidement. La majeure partie de l'écoulement a donc lieu en dessous de la ligne phréatique, donc dans la zone totalement saturée.

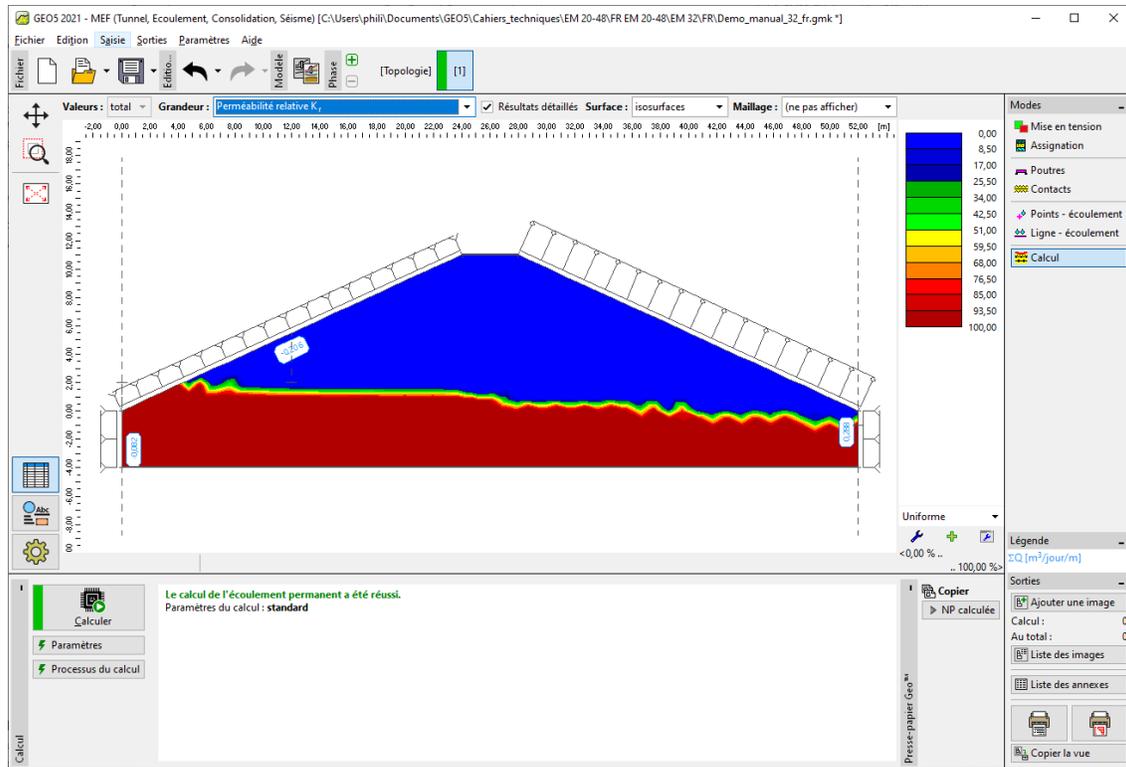


FIGURE 9 – Distribution du coefficient de perméabilité relative

3.3 Phase de calcul 2 : niveau d'eau à 9 m au dessus du terrain en amont de la digue

Dans cette phase de calcul, nous allons considérer un niveau d'eau dans le réservoir de 9 m au-dessus du terrain en face amont. Les types de conditions aux limites restent les mêmes. Seule la hauteur de pression fixée sur la face amont est modifiée (la limite verticale et inclinée sur le côté gauche du modèle - lignes n° 2 et 3). Le niveau d'eau sur ces frontières passe de 2 à 9 m. En effectuant l'analyse de flux en régime permanent avec les conditions aux limites modifiées, nous arrivons à des distributions assez différentes de toutes les variables pertinentes. En inspectant la figure ci-dessous, nous remarquons que la ligne phréatique se rapproche de la face aval. Néanmoins, il n'y a toujours pas de rejet d'eau à la surface d'infiltration et toute l'eau s'écoule du domaine sous la surface du terrain.

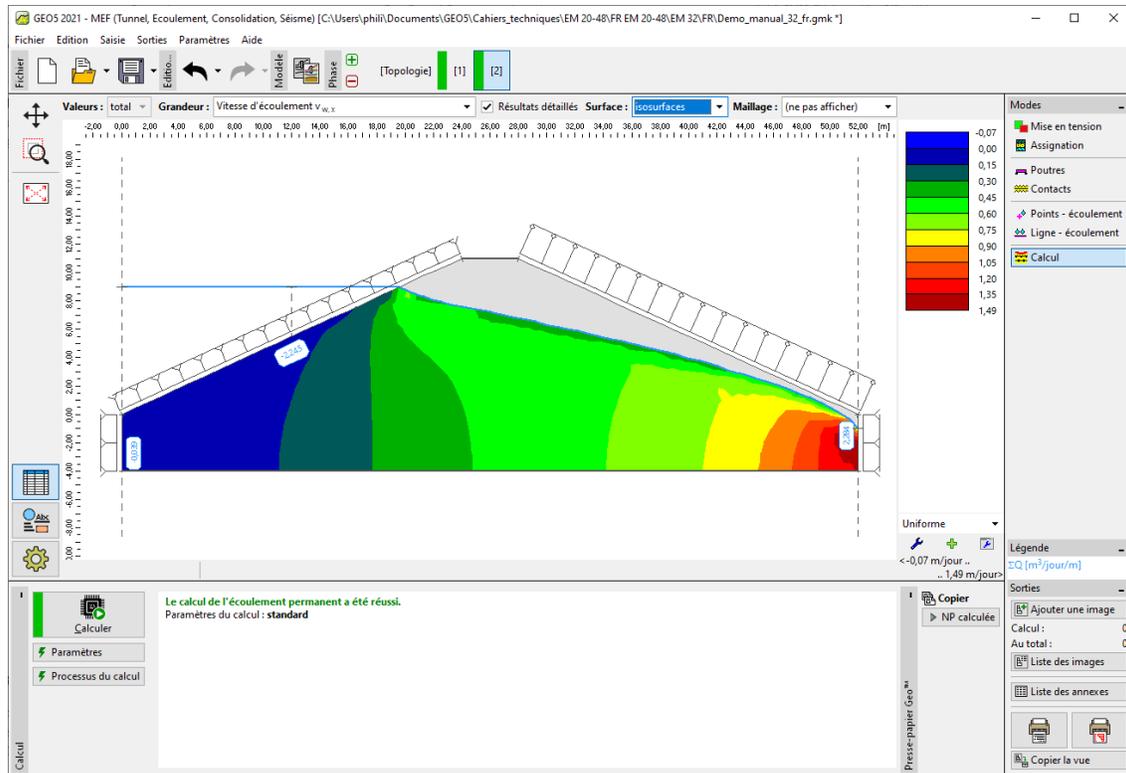


FIGURE 10 – Distribution de la composante horizontale de la vitesse d’écoulement de l’eau - Phase 2

3.4 Phase de calcul 3 : niveau d’eau à 1,8 m au dessus du terrain en amont de la digue

Dans cette phase de calcul, le niveau d’eau sur la face amont est rehaussée de 1,5 m supplémentaire pour atteindre la hauteur totale dans le réservoir de 10,8 m. Là encore, seules les deux limites de gauche ont été affectées par cet ajustement.

Les résultats de l’analyse montrent que dans ce cas la ligne phréatique touche la surface de suintement et qu’il y a une sortie d’eau libre le long de la face aval, comme le montre la valeur non nulle du flux d’eau attaché à cette surface. On note qu’en cas d’écoulement d’eau permanent, la quantité totale d’eau entrant dans le domaine doit être la même que la quantité d’eau quittant le domaine.

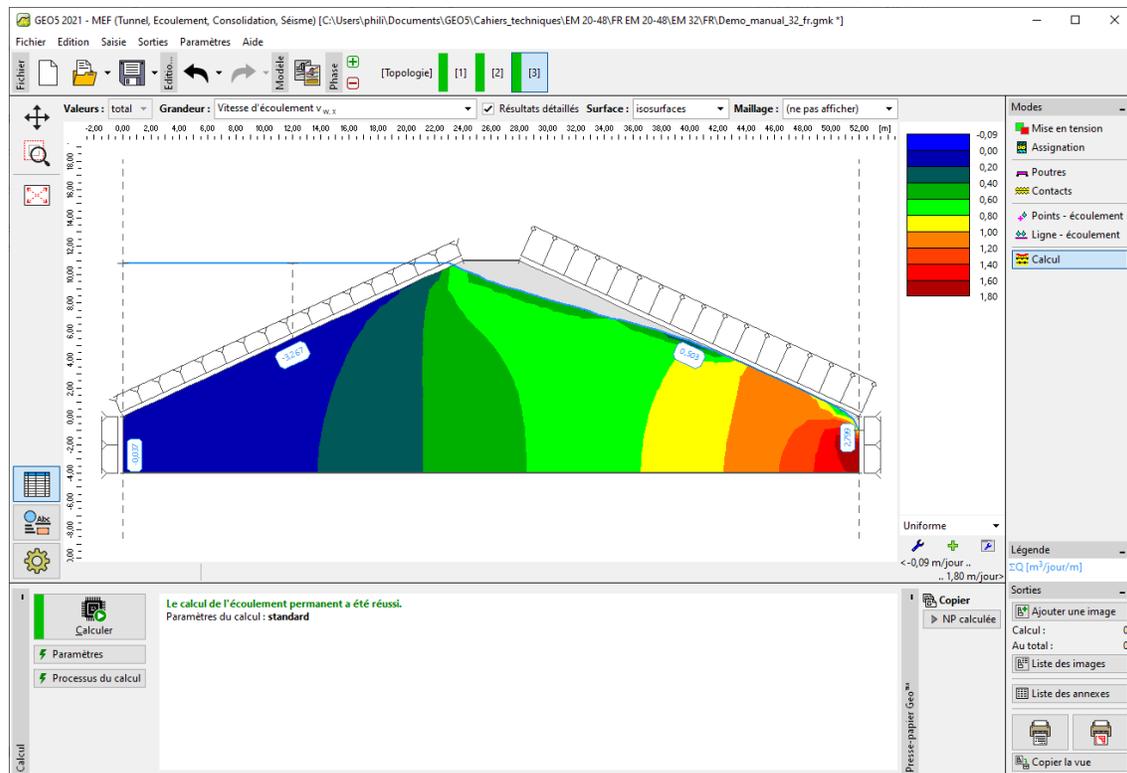


FIGURE 11 – Distribution de la composante horizontale de la vitesse d’écoulement de l’eau - Phase 3

4 Conclusion

Trois analyses ont été effectuées pour exhiber l’emplacement et la forme de la ligne phréatique pour des niveaux d’eau à 2 m, 9 m et 10,8 m dans le réservoir. Pour les deux premiers cas, l’écoulement n’a lieu que sous la surface du terrain. Lorsque l’eau dans le réservoir s’est élevée à 10,8 m, la ligne phréatique touche la face aval et l’écoulement de surface se produit.

Remarque : l’analyse montre également que la forme et la position de la ligne phréatique dépendent uniquement des conditions aux limites réelles, de la géométrie et des propriétés matérielles des sols. Contrairement à l’analyse des contraintes ou des flux transitoires, l’analyse des flux en régime permanent ne dépend pas des conditions initiales. Les différentes étapes de calcul ne se succèdent pas et peuvent être effectuées indépendamment.