

GEO5

Méthode des éléments finis : Analyse d'une structure en palplanches

Résumé

L'objectif de ce cahier technique est de réaliser l'analyse d'une structure ancrée en palplanches et de déterminer les diagrammes des efforts internes en utilisant la méthode des éléments finis.

Le fichier exemple correspondant est « Demo_manual_24.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 Projet

Déterminer l'état de contrainte (déformations) d'un rideau de soutènement ancré constitué de palplanches VL 503 ($500 \times 340 \times 9,7$ mm) en acier EN 10 025 : Fe 360. La structure du mur a une hauteur de 10 m. Les illustrations ci-dessous décrivent chacune des phases de construction. Déterminer les efforts internes agissant le long de la paroi ancrée.

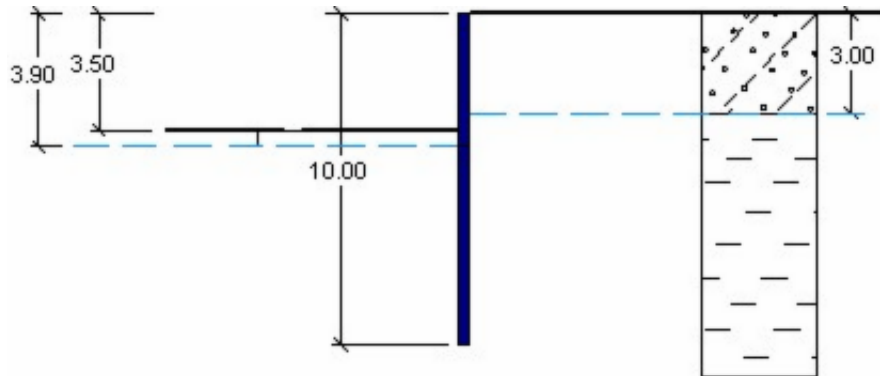


FIGURE 1 – Phase de construction 2 - Extraction du sol jusqu'à 3,5 m de profondeur

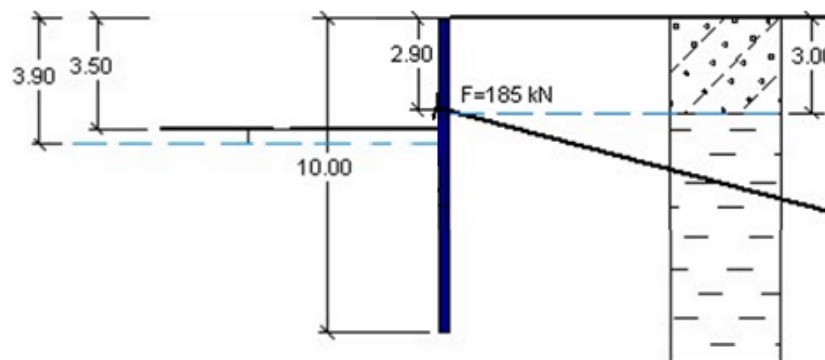


FIGURE 2 – Phase de construction 3 - Ajout de l'ancrage

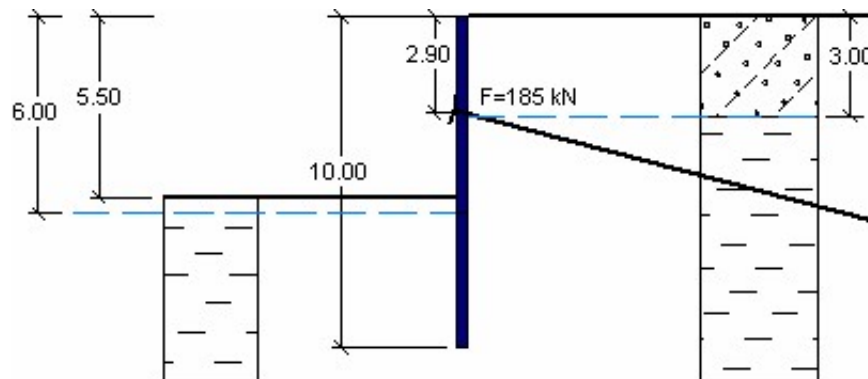


FIGURE 3 – Phase de construction 4 - Extraction du sol jusqu'à une profondeur de 5,5 m

Le profil géologique est constitué de deux couches de sols ayant les paramètres suivants :
 — de 0,0 à 3,0 m : Sable limoneux (SM - sol moyennement dense),
 — à partir de 3,0 m : Argile de faible plasticité (CL, Cl - consistance rigide).

Paramètres de sol / Classification	Sable limoneux (SM)	Argile de faible plasticité (CL, Cl)
Poids volumique du sol : γ [kN/m ³]	18	21
Module d'élasticité : E [MPa]	10	4,5
Module de détente/surcharge : E_{ur} [MPa]	20	13
Coefficient de Poisson : ν	0,3	0,4
Cohésion du sol : c_{ef} [kPa]	5	12
Angle de frottement interne : φ_{ef} [°]	29	19
Angle de dilatance : ψ [°]	0	0
Poids volumique saturé : γ_{sat} [kN/m ³]	20	23

TABLE 1 – Tableau des paramètres des sols - Paroi de palplanches ancrée

2 Solution

Nous allons utiliser le programme GEO 5-MEF pour réaliser cette analyse. La résolution de ce problème étape par étape va suivre le plan suivant :

1. Topologie : paramétrage et modélisation du problème (interface, contacts, adaptation de la densité du maillage)
2. Phase de construction 1 : contrainte géostatique primaire, spécification de points moniteurs
3. Phase de construction 2 : activation des régions, spécification des poutres, analyse des déformations et des efforts internes
4. Phase de construction 3 : spécification des ancrages
5. Phase de construction 4 : excavation du sol, analyse des résultats et suivis (moniteurs)
6. Évaluation des résultats : comparaison et conclusion.

2.1 Topologie : paramétrage du problème

La géométrie du problème est clairement *plane*, l'hypothèse de *déformation plane* s'applique au type d'analyse. Pour la première phase de construction, nous allons utiliser l'état des contraintes géostatiques comme méthode de calcul.

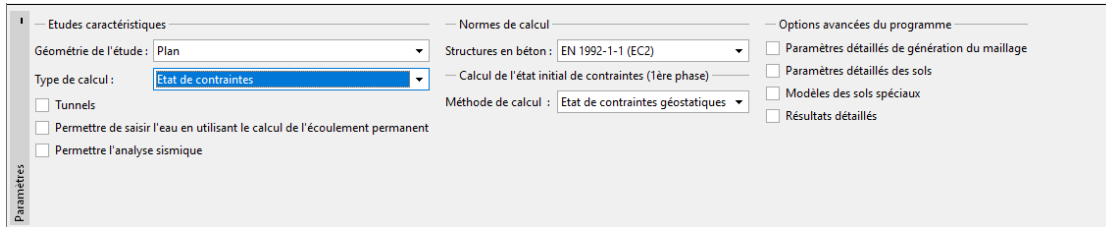


FIGURE 4 – Cadre « Paramètres »

À présent, nous allons fixer les coordonnées de l'espace de travail; nous allons choisir des dimensions suffisantes pour que les résultats ne soient pas affectés par les conditions au bord. Pour notre problème, nous allons fixer les dimensions du modèle à (-20 m; 20 m) et la profondeur du point d'interface le plus bas à 10 m.

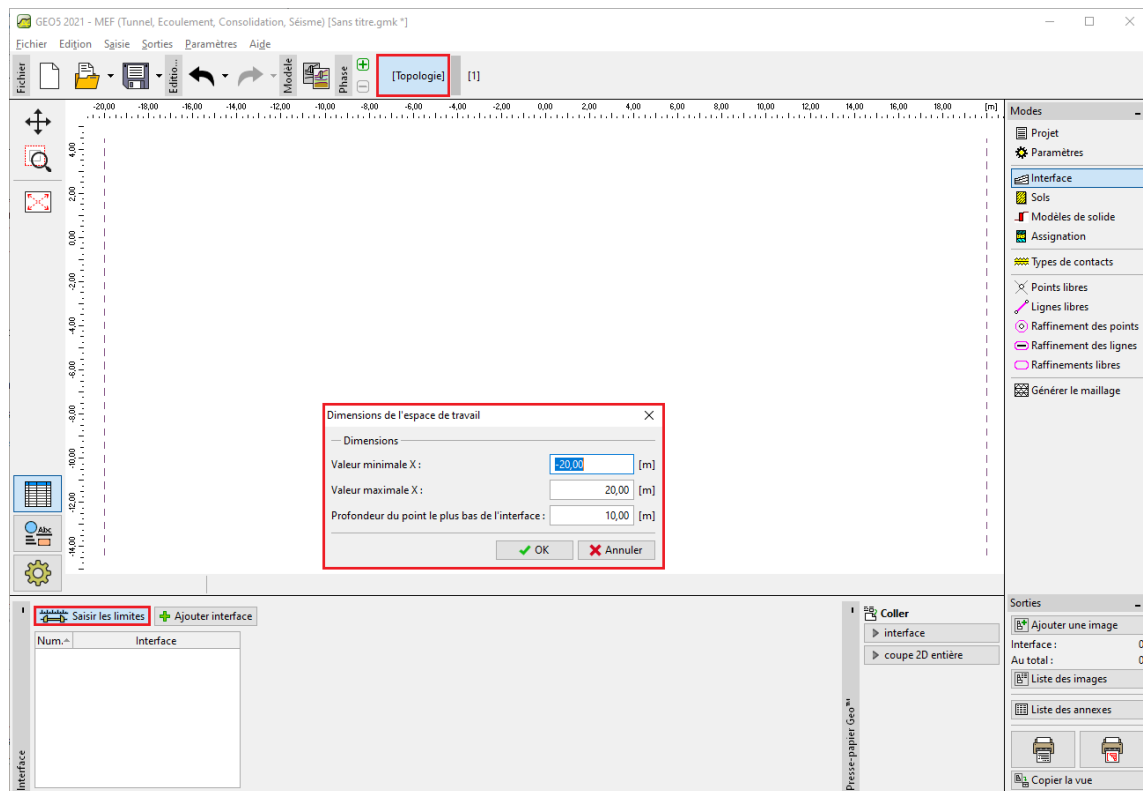


FIGURE 5 – Fenêtre de dialogue « Dimensions de l'espace de travail »

Lors de la conception de structures de soutènement, il convient de définir les profondeurs jusqu'à lesquelles le sol sera excavé à chaque phase de construction en tant qu'interfaces du sol. Pour ce problème, nous allons fixer donc le niveau de la surface du terrain à 0,0 m et les interfaces horizontales aux cotes : -3,0 m, -3,5 m et -5,5 m. Le point de coordonnées (0,0;0,0) définit le haut de la paroi.

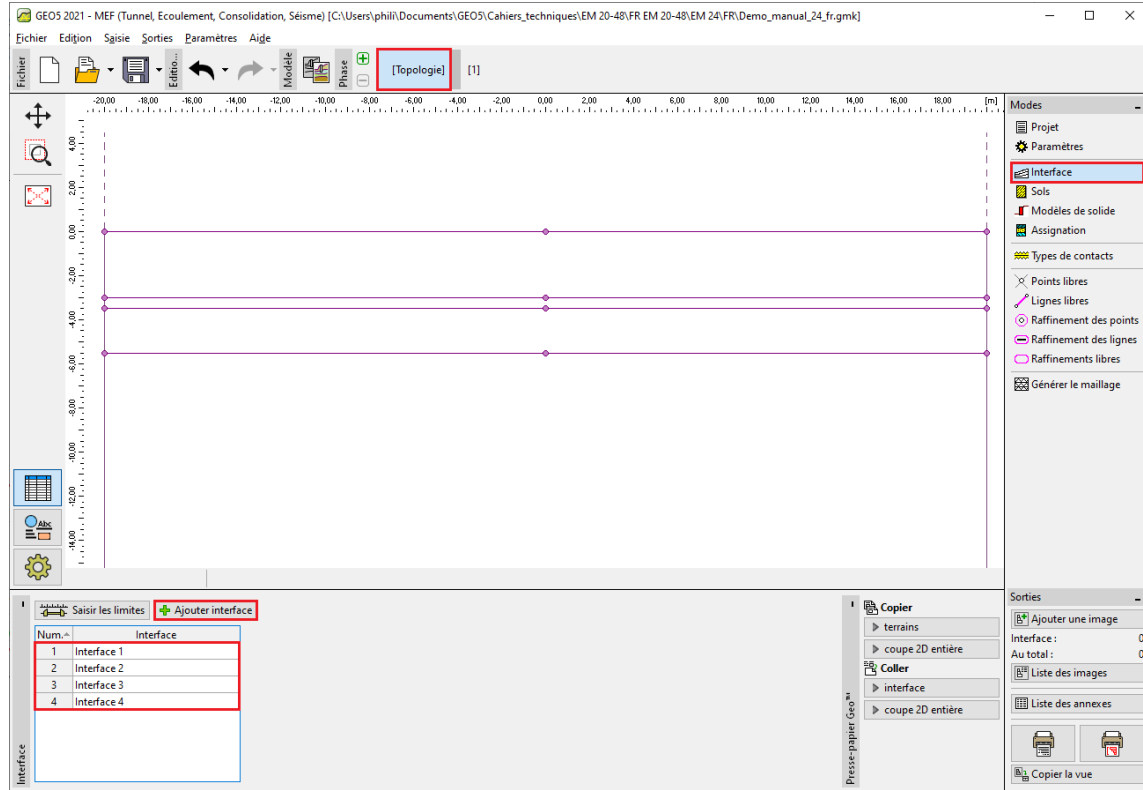


FIGURE 6 – Cadre « Interfaces »

Nous allons maintenant spécifier les paramètres des sols puis les assigner aux interfaces précédemment créées. Nous allons utiliser le modèle de Mohr-Coulomb modifié (cf. Remarque *infra*).

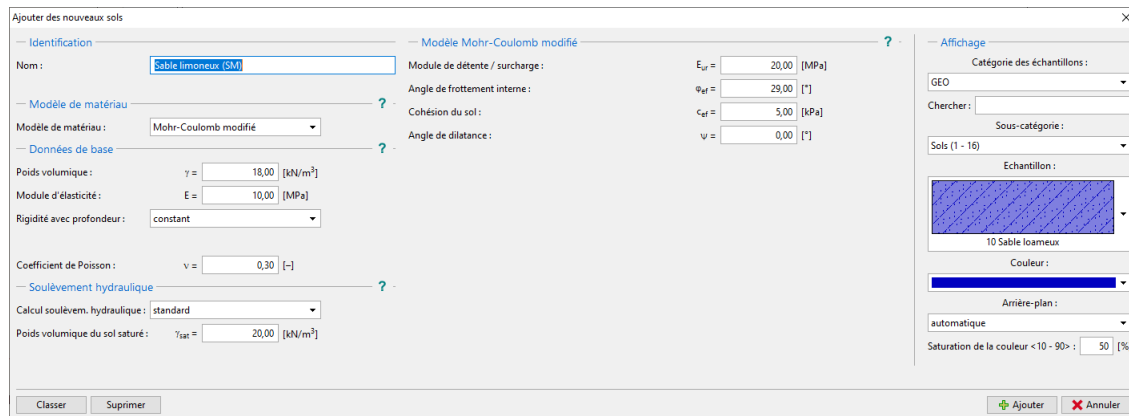


FIGURE 7 – Fenêtre de dialogue « Ajouter des nouveaux sols » - Sable limoneux (SM)

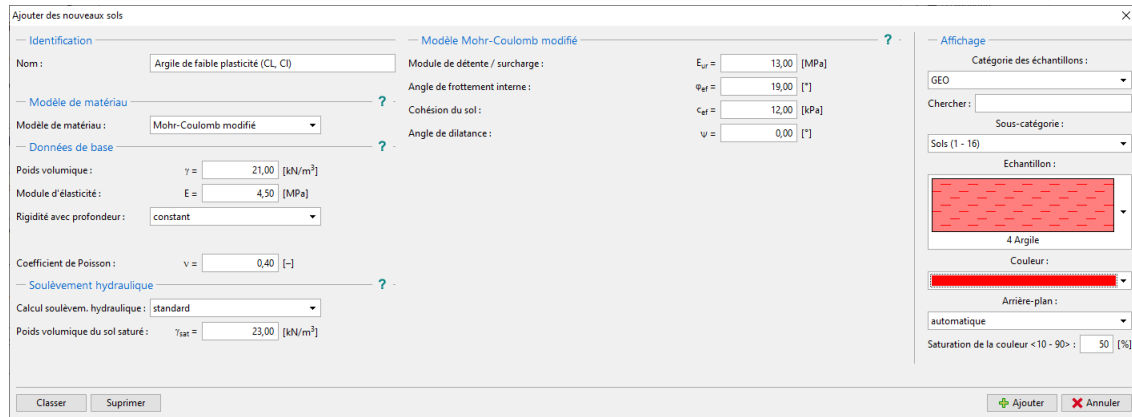


FIGURE 8 – Fenêtre de dialogue « Ajouter des nouveaux sols » - Argile de faible plasticité (CL, CI)

Remarque : lors de la conception des structures telles que celle décrite ici, il est nécessaire d'introduire des éléments de contact entre le sol et la poutre. La résolution de problèmes sans éléments de contact conduit à des résultats totalement irréalistes (pour plus de détails, consultez l'Aide - F1).

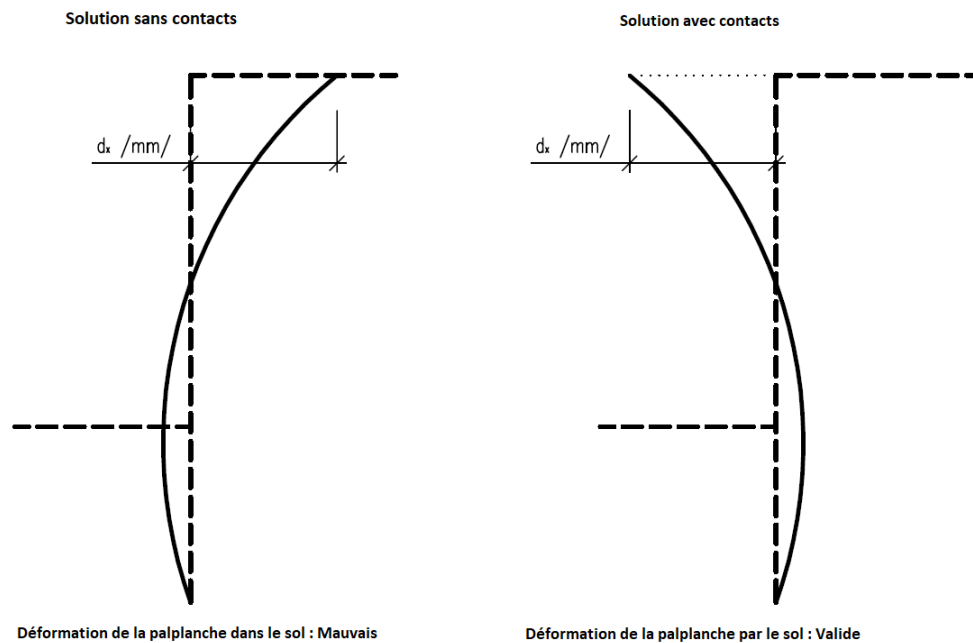


FIGURE 9 – L'application d'un modèle de matériau approprié à l'analyse numérique des structures en palplanche

L'illustration ci-dessous montre l'assignation des sols au profil géologique :

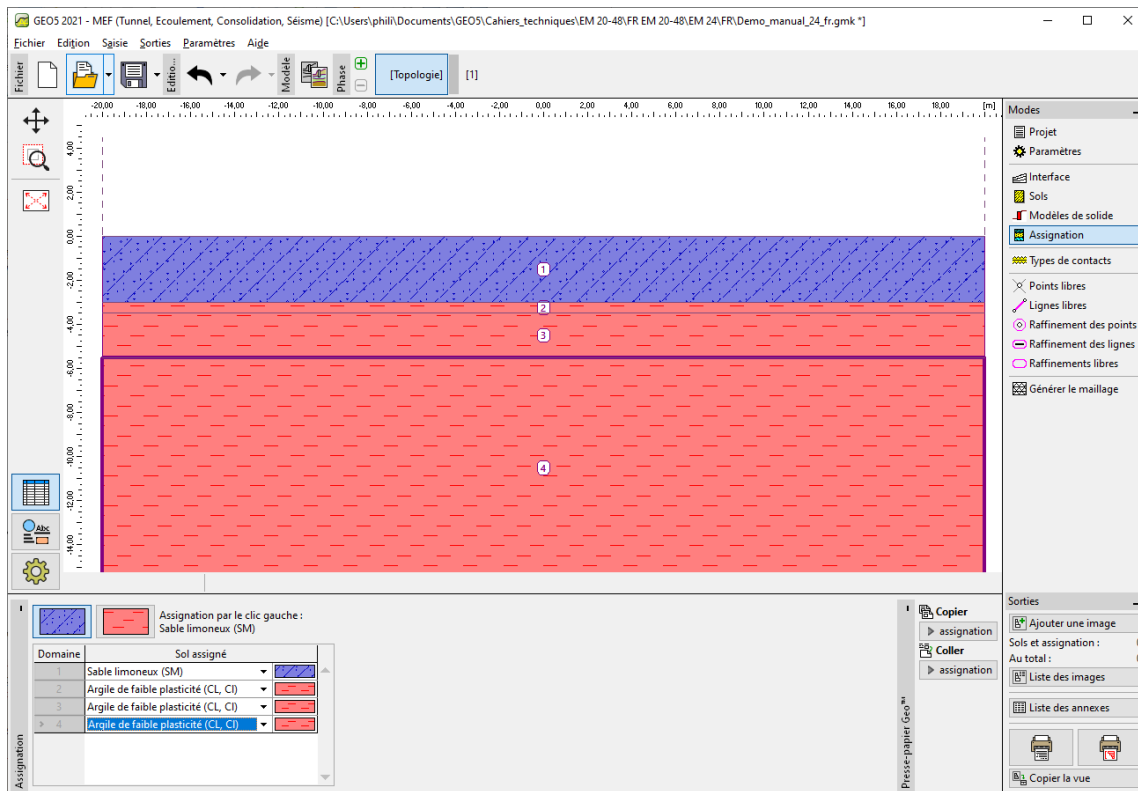


FIGURE 10 – Cadre « Assignation »

L'étape suivante consiste à définir les paramètres de contact (en cliquant sur le bouton « Ajouter » du cadre « Types de contacts »). Lors de l'analyse des structures en palplanches, il convient de toujours définir le contact avec le modèle de matériau non linéaire pour les éléments de poutre. Pour ce problème, nous allons utiliser l'option « Mohr-Coulomb » pour obtenir des résultats réalistes. Nous supposons que la réduction des paramètres du sol sur le contact est $\delta c = \delta \mu = 0,3$ et conserverons les valeurs standards de la rigidité du contact $K_s = K_n = 20000 \text{ kN/m}^3$.

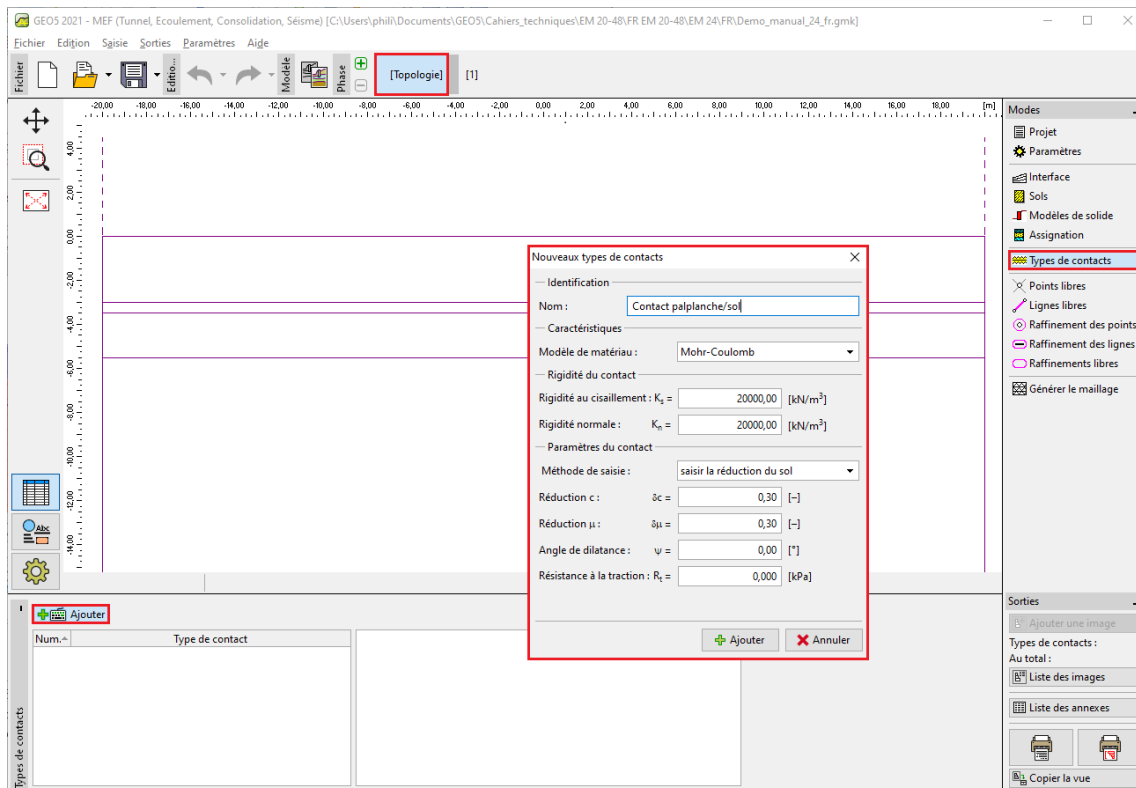


FIGURE 11 – Fenêtre de dialogue « Nouveaux types de contacts »

Remarques :

1. les éléments de contact sont utilisés dans les analyses lorsqu'il est nécessaire de permettre l'interaction entre la structure et le milieu environnant - une interface entre deux matériaux totalement différents (sol - palplanche). Un exemple typique d'utilisation d'éléments de contact est la modélisation de structures en palplanche, de murs de soutènement ou de revêtements de tunnels, où l'élément de contact est utilisé pour simuler une mince zone de sol ou de roche dans laquelle une contrainte intense, surtout une contrainte de cisaillement, se produit. Les contacts peuvent être introduits même entre chaque interface de sol. L'élément de contact est un élément d'épaisseur nulle, exprimant la relation entre les contraintes de contact et les variations relatives des déplacements le long du contact (pour plus de détails, consultez l'Aide - F1).

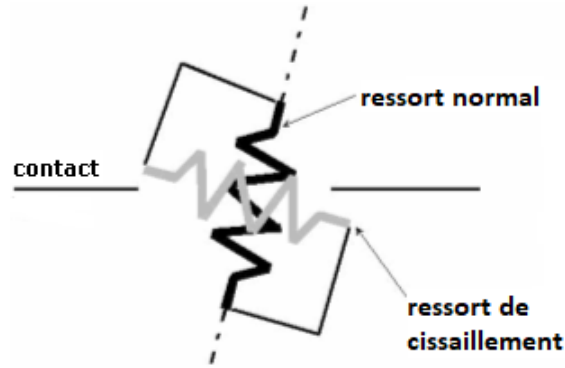


FIGURE 12 – Représentation schématique d'un élément de contact

2. bien que le choix du paramètre K_s ne soit pas important dans le cas d'un comportement complètement plastique du contact, sa valeur est cruciale pour résoudre efficacement le problème non linéaire en question. Des valeurs trop élevées (au-dessus de 100000 kN/m^3) peuvent conduire à une oscillation de la solution numérique. A l'opposé, des valeurs trop faibles de K_s et K_n (sous 10000 kN/m^3) peuvent conduire à des déformations irréalistes de la structure. Cependant, les valeurs des contraintes de contact K_s et K_n elles-mêmes ne sont pas significativement affectées par le choix de la rigidité K_s et K_n (pour plus de détails, consultez l'Aide - F1).

A présent, nous allons définir la géométrie de la structure dans les cadres « Points libres » et « Lignes libres ». Leur principe de la définition a été décrit plus en détail dans le chapitre 23 : Analyse du revêtement d'un collecteur.

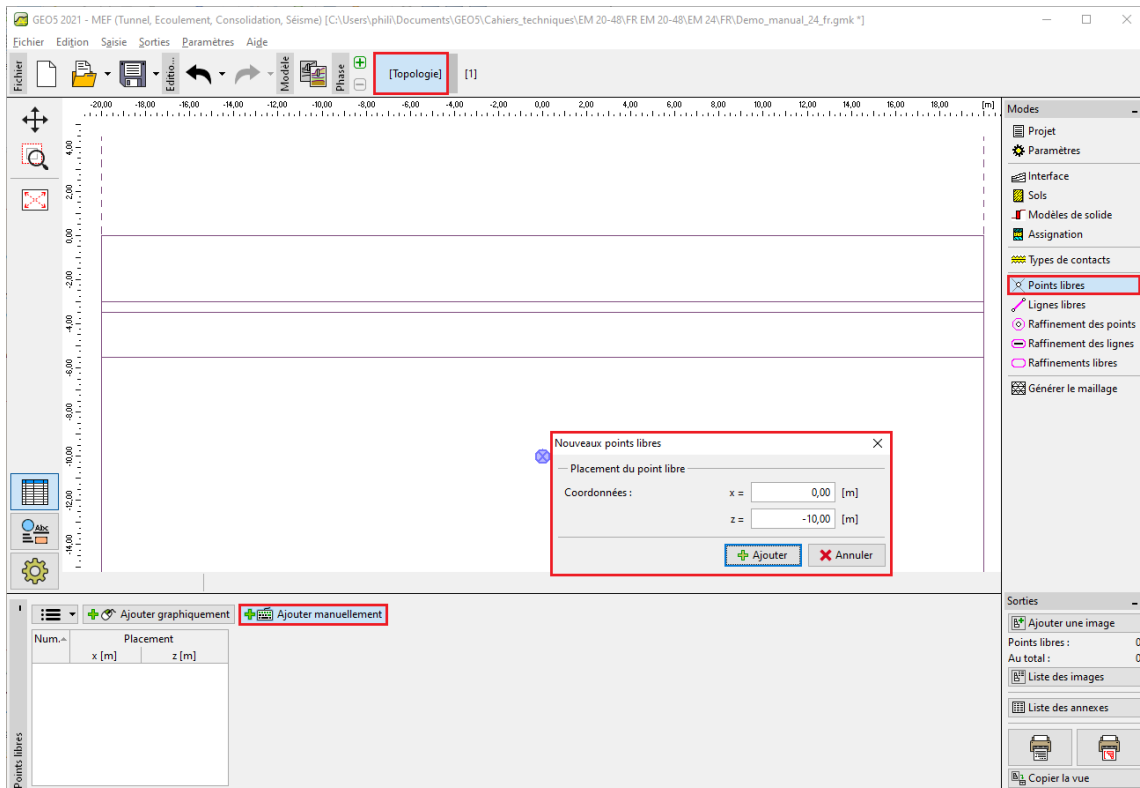


FIGURE 13 – Fenêtre de dialogue « Nouveaux points libres »

Nous allons d'abord définir un nouveau point libre avec des coordonnées $(0, 0; -10, 0)$. La ligne libre formant le rideau de palplanches découlera de la connexion entre ce point et le point d'interface du terrain (pour plus de détails, consultez l'Aide - F1).

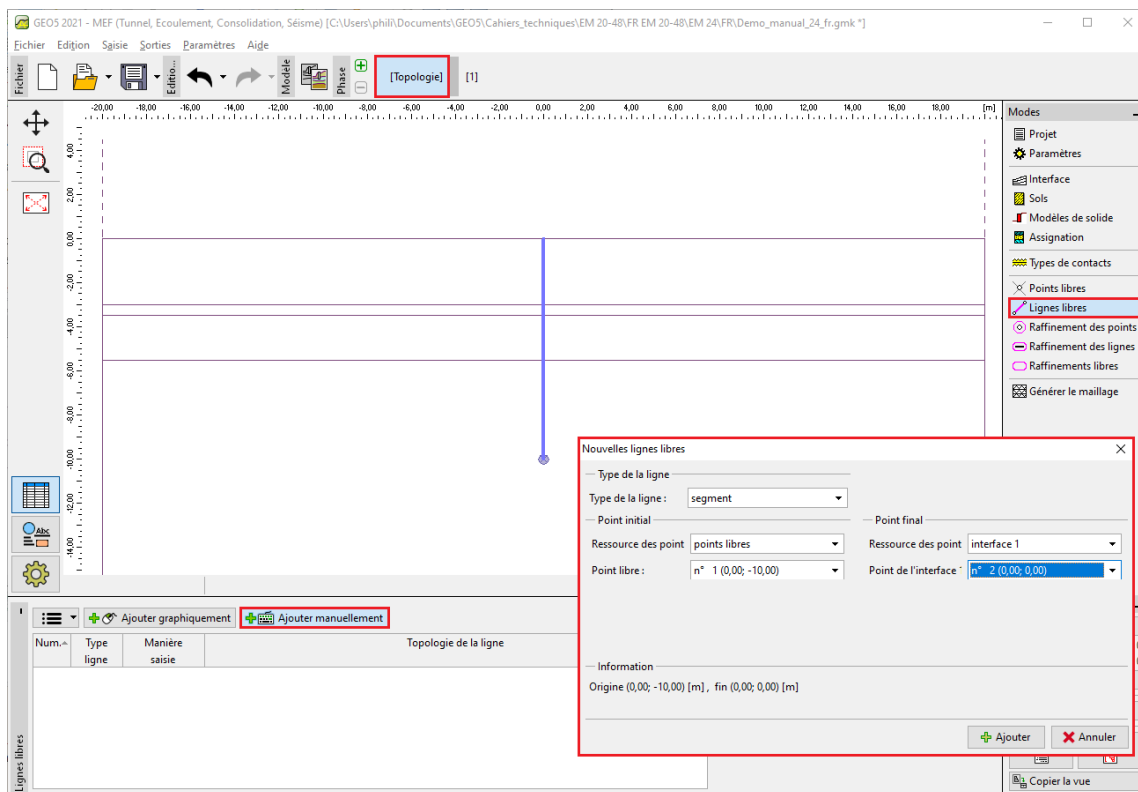


FIGURE 14 – Fenêtre de dialogue « Nouvelles lignes libres »

La dernière étape de définition de la topologie est la génération du maillage par éléments finis. Il est raisonnable de raffiner le maillage au voisinage de la paroi en palplanches. Dans la fenêtre de dialogue « Nouveaux raffinements des lignes », nous allons choisir un rayon de $r = 5,0$ m et une longueur de $l = 0,25$ m.

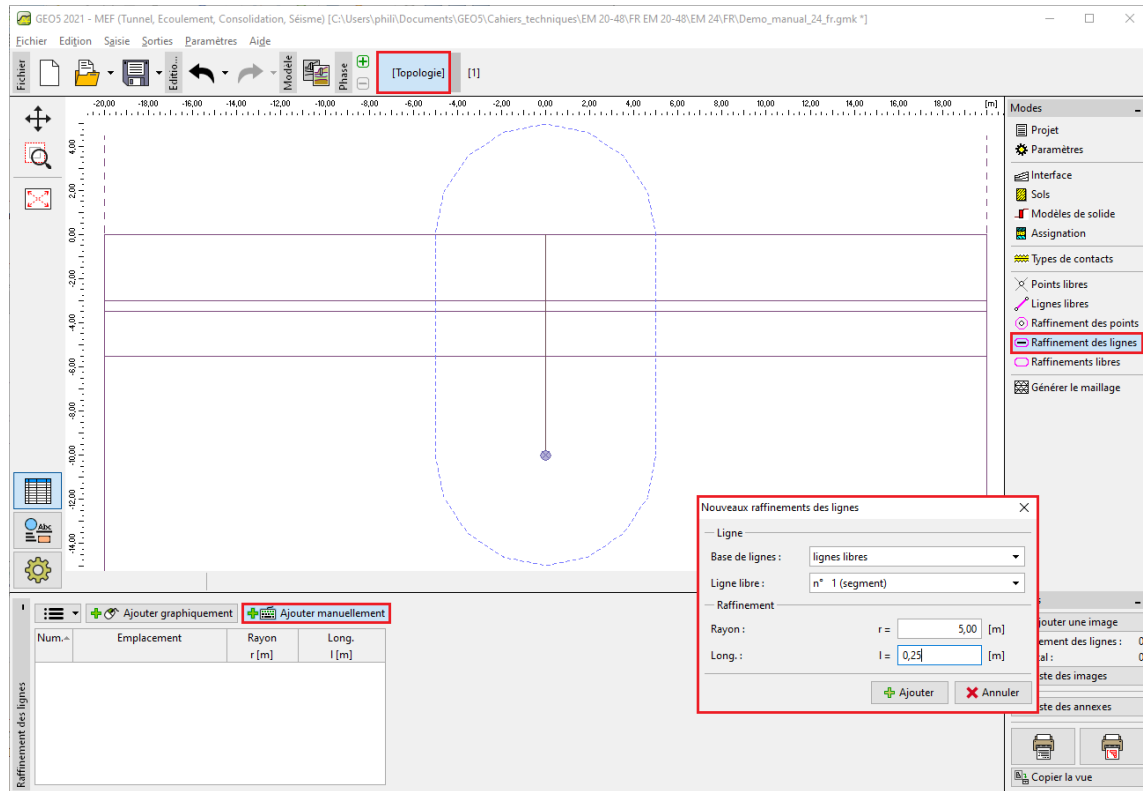


FIGURE 15 – Fenêtre de dialogue « Nouveaux raffinements des lignes »

Ensuite, nous allons passer au cadre « Générer le maillage » et générer un maillage avec une longueur d'arête de 1,0 m (en cliquant sur le bouton « Générer »). Le programme va lisser automatiquement le maillage raffiné.

Remarque : il convient de vérifier visuellement que la densité du maillage des éléments finis est adaptée à l'étendue de l'espace de travail et à la complexité du problème donné (pour plus de détails, consultez l'Aide - F1). L'augmentation de la densité du maillage contribue à la stabilité de l'analyse non linéaire tout comme la diminution de la rigidité au cisaillement.

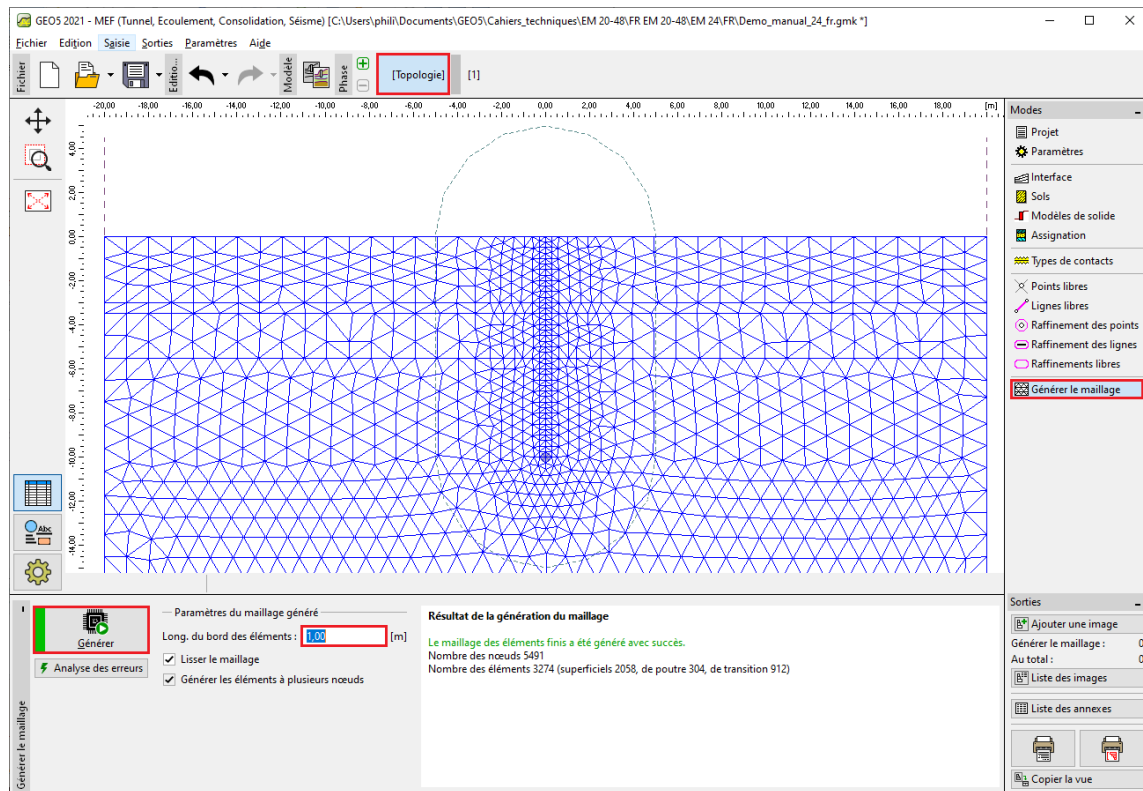


FIGURE 16 – Cadre « Générer le maillage » - longueur du bord de l'élément de 1 m (avec une densité de maillage localement augmentée)

2.2 Phase de construction 1 : contraintes géostatiques primaires

Après avoir généré le maillage, nous allons passer à la phase de construction 1 et définir le niveau de la nappe phréatique à une profondeur de 3,0 m sous la surface du terrain (*cf.* illustration).

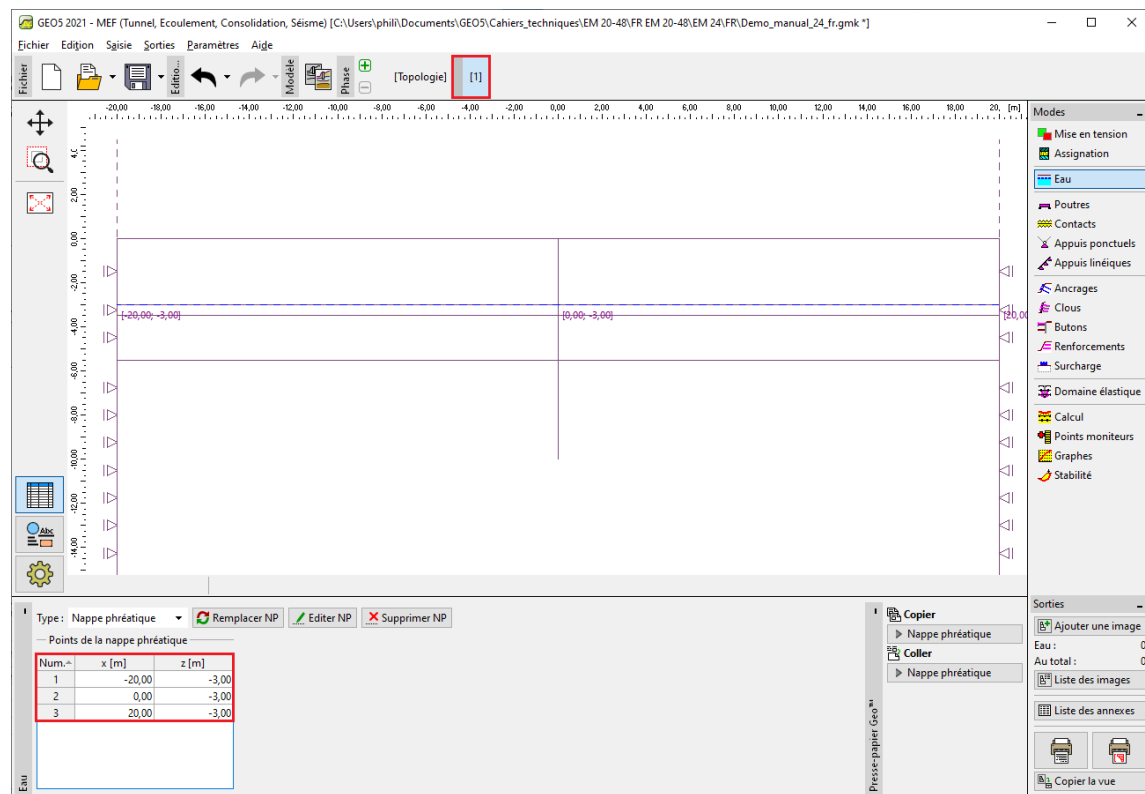


FIGURE 17 – Cadre « Eau » - Phase de construction 1 (nappe à 3,0 m de profondeur)

Nous allons soumettre l'analyse des contraintes géostatiques primaires en laissant le paramètre de calcul sur «Standard» (pour plus de détails, consultez l'Aide - F1).

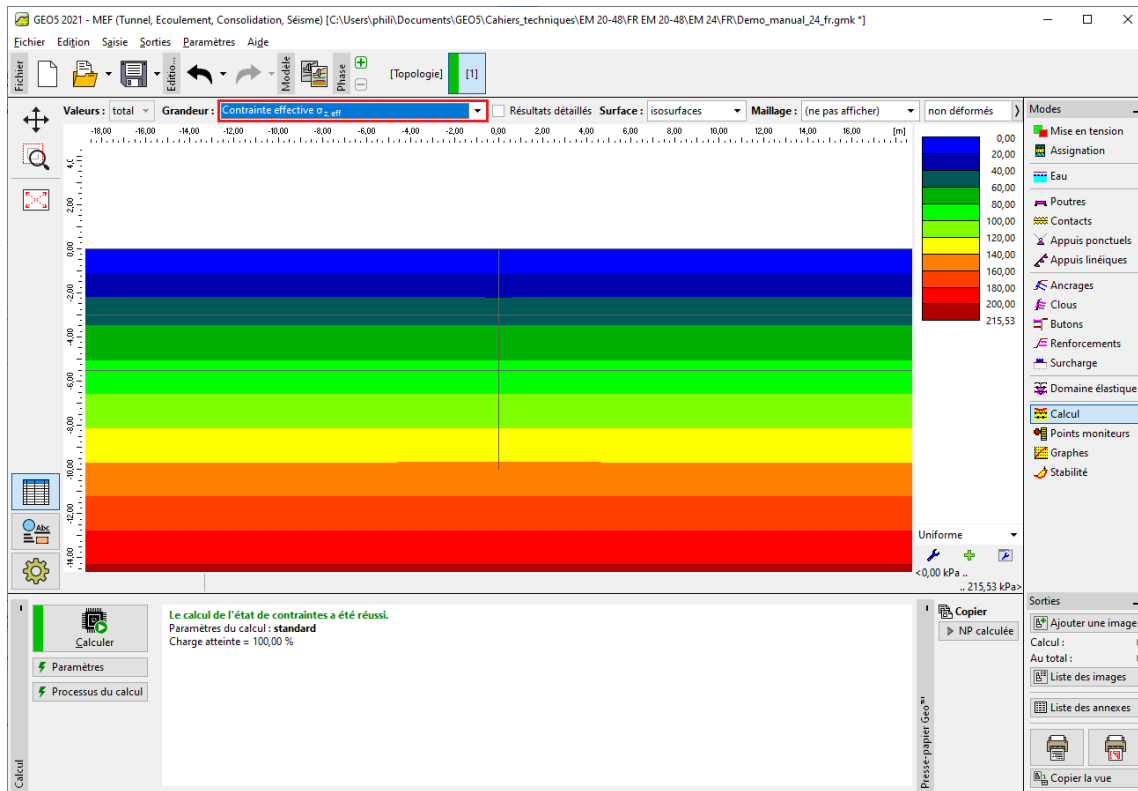


FIGURE 18 – Cadre « Analyse » - Phase de construction 1 (contrainte géostatique verticale $\sigma_{z,ef}$)

Dans le but d'observer les valeurs de certaines grandeurs (au cours de l'analyse des différentes phases de construction), nous allons définir des points moniteurs dans le programme (en cliquant le bouton « Ajouter » du cadre « Points moniteurs »). Nous allons sélectionner les emplacements à surveiller aux points qui représentent la tête et le pied du rideau de palplanches à modéliser, c'est-à-dire $(0, 0; 0, 0)$ et $(0, 0; -10, 0)$, et un dans la région du fond de fouille $(0, 0; -5, 5)$.

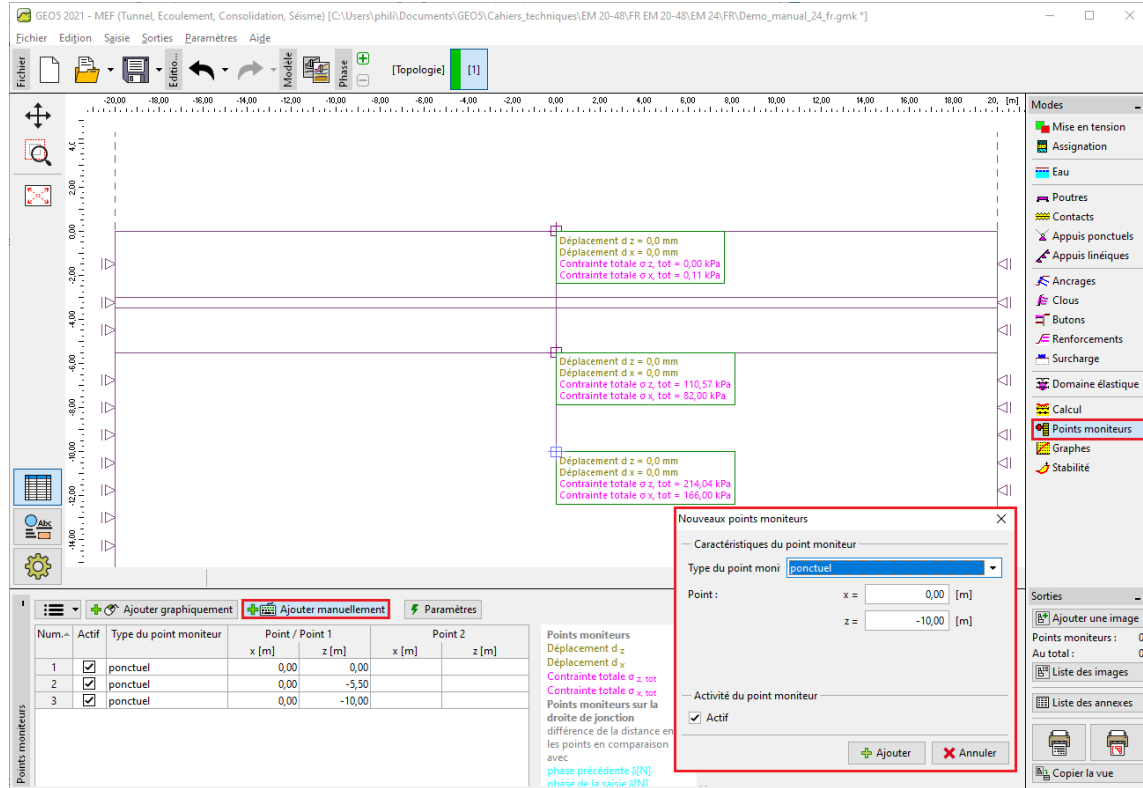


FIGURE 19 – Cadre « Moniteurs » - Phase de construction 1 (points moniteurs)

Remarque : le bouton « Paramètres » (en bas à droite de l'écran) permet de sélectionner les grandeurs à afficher. Lors de l'analyse de la structure, nous nous intéressons surtout à l'évolution des contraintes géostatiques et à l'ampleur des déplacements verticaux ou latéraux.

2.3 Phase de construction 2 : modélisation des éléments de poutre

Dans cette phase de construction, nous allons d'abord passer au cadre « Poutres » et modéliser le rideau de palplanches. Nous allons définir les caractéristiques suivantes : l'emplacement, le matériau et la classe d'acier, le type de profil (VL 503), le support des extrémités de poutre et des contacts (pour plus de détails, consultez l'Aide - F1).

The screenshot shows the 'Nouvelles poutres' dialog box with the following configuration:

- Topologie**
 - Emplacement : ligne libre
 - Ligne libre : Ligne libre n° 1
- Paramètres**
 - Considérer le poids propre
- Installation**
 - Nom : Palplanche n° 1
 - Début : [dropdown]
 - Fin : [dropdown]
- Section et matériau**
 - Type de la section : palplanche
 - Type du matériau : acier
 - Palplanche : VL 503
 - Nom : EN 10025 : Fe 360
- Contacts**
 - Considérer le contact à gauche
 - Considérer le contact à droite
 - Type de contact : Contact palplanche/sol

Technical data displayed: $I_y = 2,12E-04 \text{ m}^4/\text{m}$; $A = 1,49E-02 \text{ m}^2/\text{m}$; $E = 210000,00 \text{ MPa}$; $G = 81000,00 \text{ MPa}$

FIGURE 20 – Fenêtre de dialogue « Nouvelles poutres » - Phase de construction 2

Passons à présent au cadre « Mise en tension » dans lequel nous allons modéliser l'excavation du sol - les régions à désactiver sont données sur l'illustration ci-dessous, la modification de l'état d'une région peut se faire soit en utilisant le clic droit, soit en utilisant le tableau en bas du cadre (pour plus de détails, consultez l'Aide - F1).

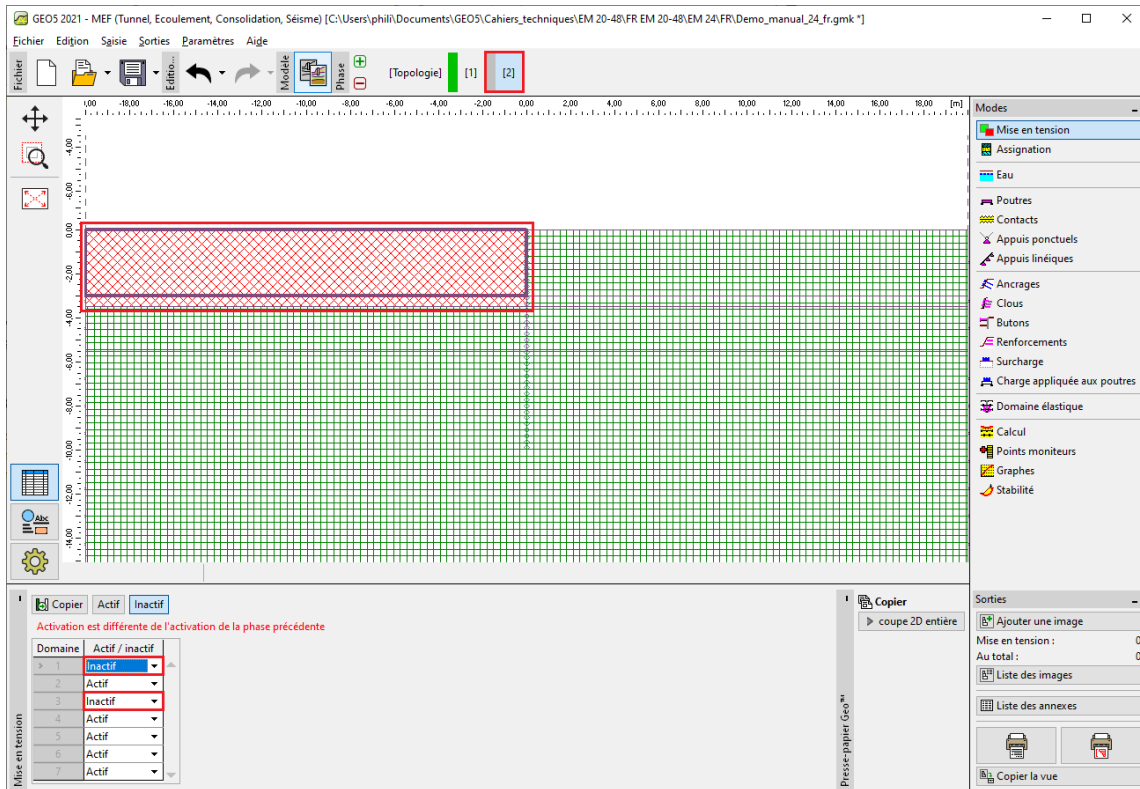


FIGURE 21 – Cadre « Mise en tension » - Phase de construction 2

Remarque : d'après la figure précédente, il est clair que le correcteur automatique de structure intégré au programme a divisé l'interface du sol coupée par le mur en zones délimitées individuelles (pour plus d'informations, voir Aide - F1).

Dans le cadre « Eau », nous allons modifier la nappe phréatique selon la figure ci-dessous (les autres paramètres restant inchangés).

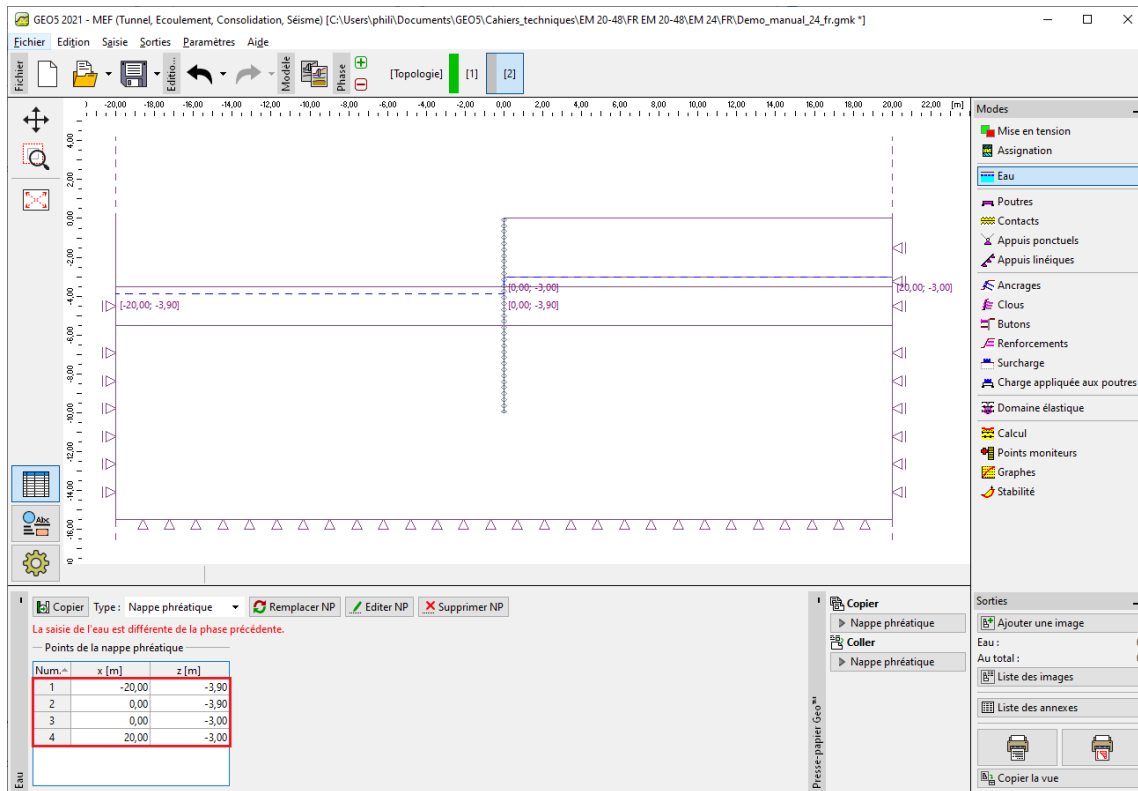


FIGURE 22 – Cadre « Eau » - Phase de construction 2 (modification de la nappe phréatique)

Nous allons maintenant soumettre l'analyse de la phase de construction 2 et examiner les résultats sous forme de diagramme pour les efforts internes le long de la poutre, la déformation plastique déviatorique équivalente et la structure déformée.

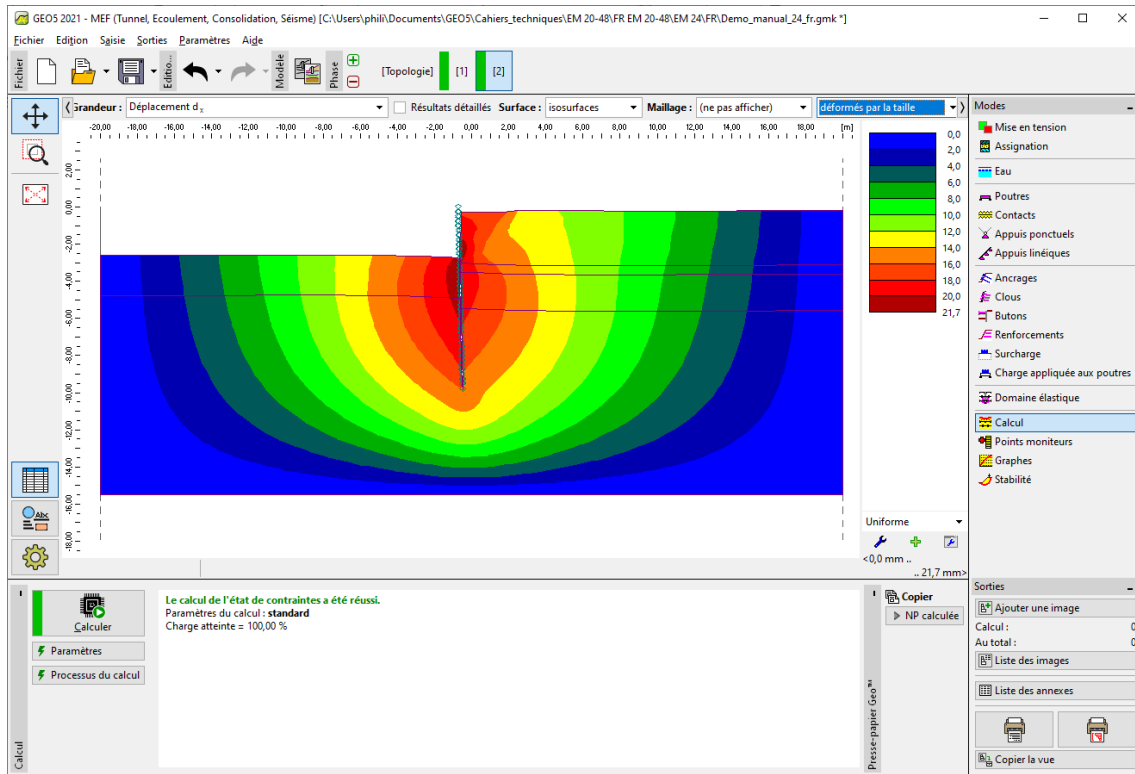


FIGURE 23 – Cadre « Calcul » - Phase de construction 2 (tassement d_x - structure déformée)

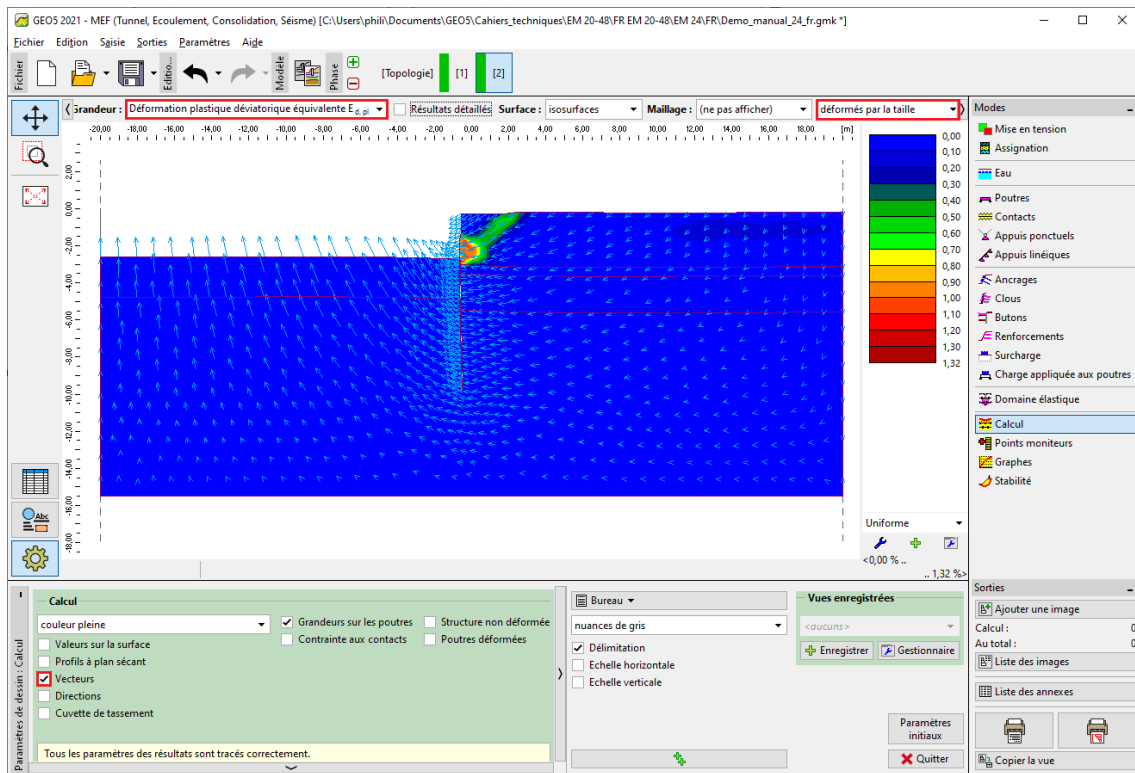


FIGURE 24 – Cadre « Calcul » - Phase de construction 2 (déformation plastique déviatorique équivalente $\varepsilon_{d,pl}$ - vecteurs de déplacement)

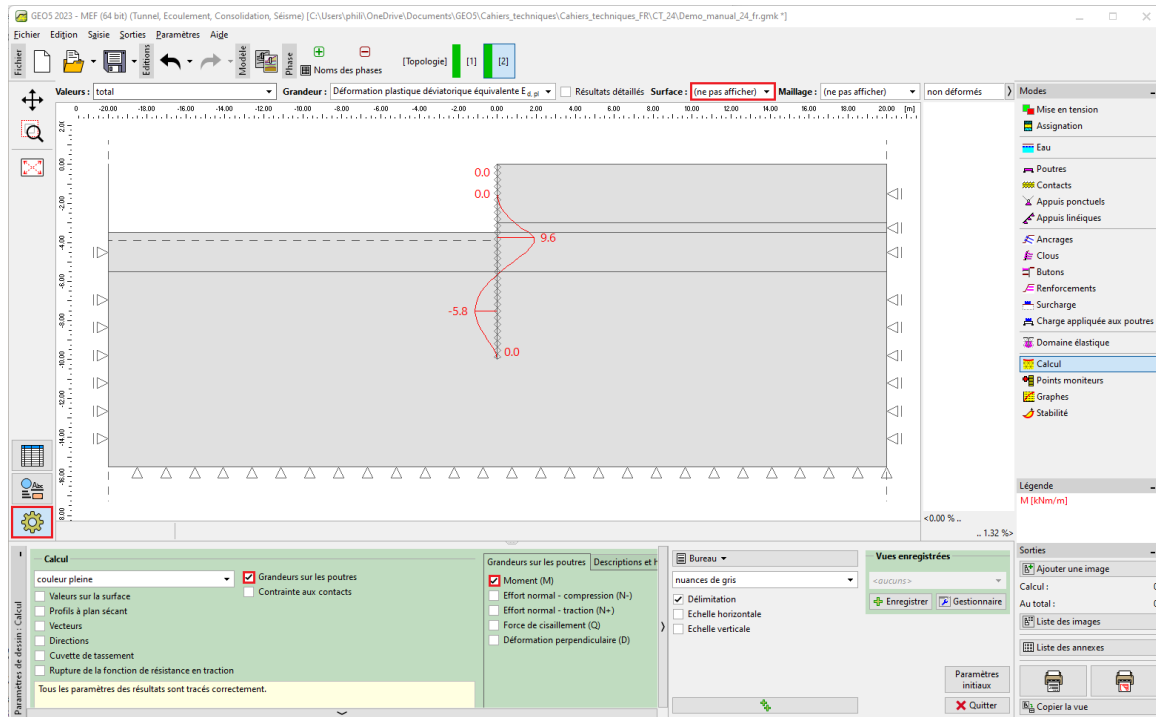


FIGURE 25 – Cadre « Calcul » - Phase de construction 2 (distribution du moment de flexion M)

2.4 Phase de construction 3 : paramétrage des ancrages

Nous allons ajouter la phase de construction 3 ; dans le cadre « Ancrages », nous allons cliquer sur le bouton « Ajouter », dans la fenêtre de dialogue « Nouveaux ancrages », nous allons définir un ancrage en acier subissant une force de précontrainte $F = 185 \text{ kN}$. L'ancrage sera placé à une profondeur de 2,9 m sous la surface du terrain, les coordonnées de la tête d'ancrage seront matérialisées par le point $(0, 0; -2, 9)$.

Remarque : les ancrages sont modélisés dans le programme au moyen d'un élément de tige élastique de rigidité normale constante. La défaillance de l'élément d'ancrage est contrôlée en spécifiant la force maximale. L'ancrage est fixé au sol en deux points - en tête et à la racine. Aucune interaction entre le sol et l'élément de renforcement n'est supposée le long de la longueur de l'ancre (pour plus de détails, consultez l'Aide - F1).

Pour ce problème particulier, nous allons utiliser les paramètres d'ancrage suivants :

- longueur : $l = 12 \text{ m}$
- inclinaison : $\alpha = 15^\circ$
- diamètre : $d = 10 \text{ mm}$
- espacement : $b = 1 \text{ m}$.

Remarque : la rigidité de l'ancrage considérée dans le calcul est définie par le module d'élasticité, l'aire de sa section et l'espacement. Il est à noter qu'en cas de déformation plane, les ancrages discrets sont remplacés par une membrane d'une largeur de 1 m. Deux autres données importantes concernant les ancrages sont la force de précontrainte et la force à la rupture. Pour le cas qui nous occupe, nous n'envisagerons pas la possibilité d'une rupture de l'élément de renforcement, c'est pourquoi nous utiliserons une valeur suffisamment importante pour l'intensité de l'effort de traction limite (pour plus, consultez l'Aide - F1).

Nouveaux ancrages

— Mise en place de l'ancrage

Origine : attacher au terrain de la phase actuelle

x = 0,00 [m]

z = -2,90 [m]

Fin : saisir long. et inclinaison de l'ancrage

Long. : l = 12,00 [m]

Inclin. : α = 15,00 [°]

Distance entre les ancrages : b = 1,00 [m]

— Rigidité de l'ancrage

Méthode de saisie : diamètre de l'ancrage

Diamètre : d = 10,0 [mm]

Module d'élast. : E = 210000,00 [MPa]

Effort de traction limite : F_c = 1000,00 [kN]

Considérer l'action en compression

— Effort de l'ancrage

Force : F = 185 [kN]

+ Ajouter X Annuler

FIGURE 26 – Fenêtre de dialogue « Nouveaux ancrages » - Phase de construction 3

Remarques :

- 1. l'ancrage se déforme pendant le calcul. Ce qui justifie que la force de précontrainte spécifiée peut diminuer. Par conséquent, si nous voulons obtenir une force de précontrainte spécifique, il convient d'appliquer cette force à l'ancrage dans la phase suivante, ou d'entrer une force de précontrainte suffisamment plus grande (la force résultante dans l'ancrage après calcul est affichée au niveau de la tête d'ancrage sous la force de précontrainte spécifiée). Dans les phases de construction suivantes, les paramètres de l'ancrage ne peuvent pas être modifiés, seule la force de précontrainte peut être modifiée ou retirée*
- 2. la mise en place de l'ancrage dans le massif doit être suffisamment résistante (fixation à un élément) pour éviter un arrachement irréaliste de l'ancrage lorsque des déformations plastiques importantes se produisent autour de sa racine (fixation à un nœud, trop grande augmentation de la densité autour de la racine) entraînant une perte irréaliste de la force de précontrainte.*

Nous allons maintenant procéder à l'analyse de l'étape de construction 3 et examiner à nouveau les résultats de la solution numérique (de la même manière que pour l'étape de construction précédente).

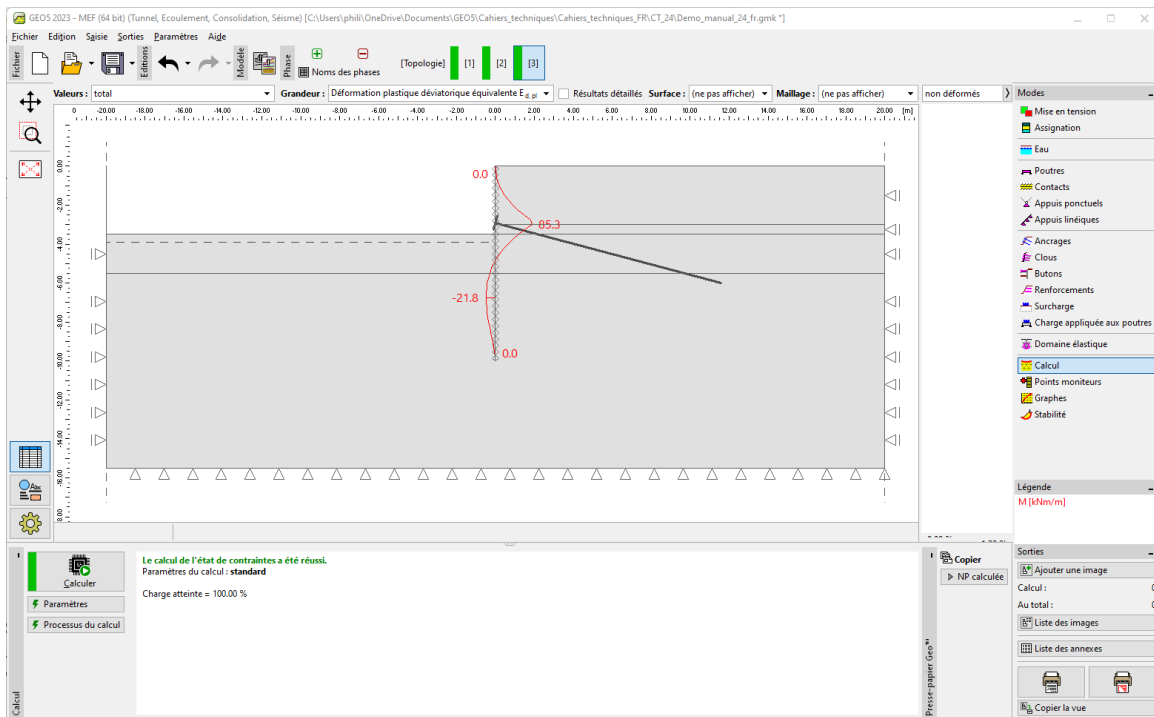


FIGURE 27 – Cadre « Calcul » - Phase de construction 3

2.5 Phase de construction 4 : extraction du sol restant

Nous allons ajouter la phase de construction 4 et extraire le sol restant. Tout d'abord, dans le cadre « Mise en tension », nous allons sélectionner la région à supprimer avec le curseur de la souris et cliquer sur le bouton « Inactif ».

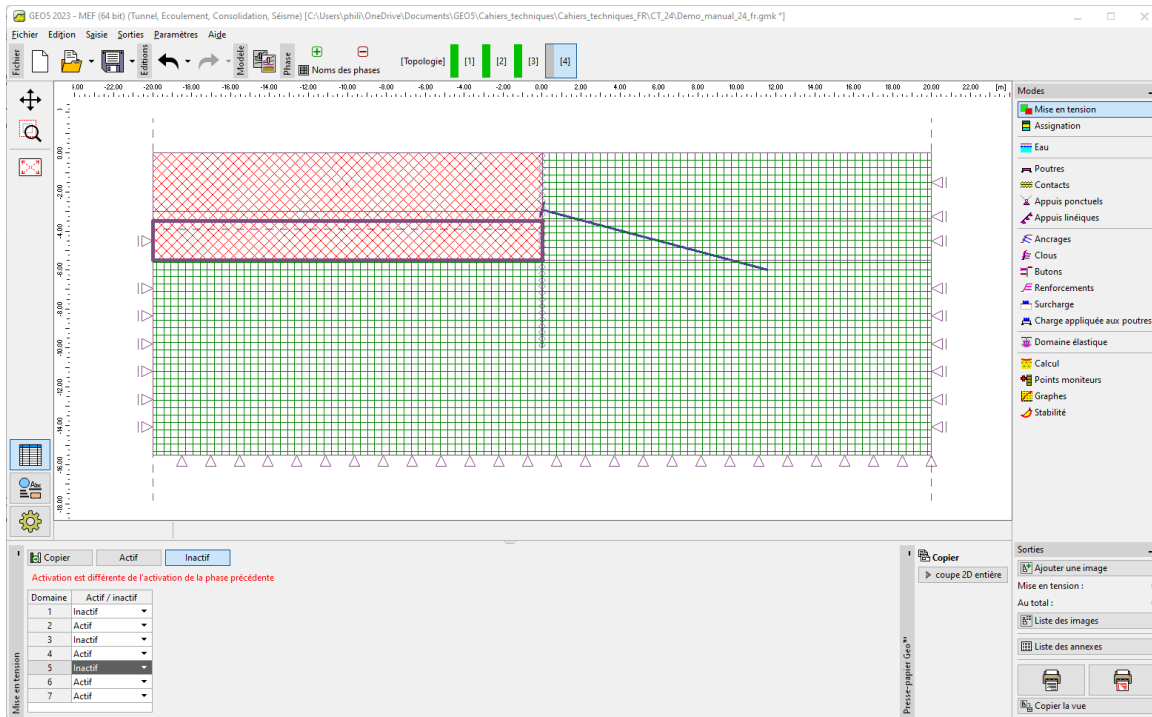


FIGURE 28 – Cadre « Mise en tension » - Phase de construction 3

Dans la dernière étape de définition de la phase de construction 4, nous allons modifier le niveau de la nappe phréatique selon le schéma ci-dessous, les autres paramètres d'entrée restant inchangés.

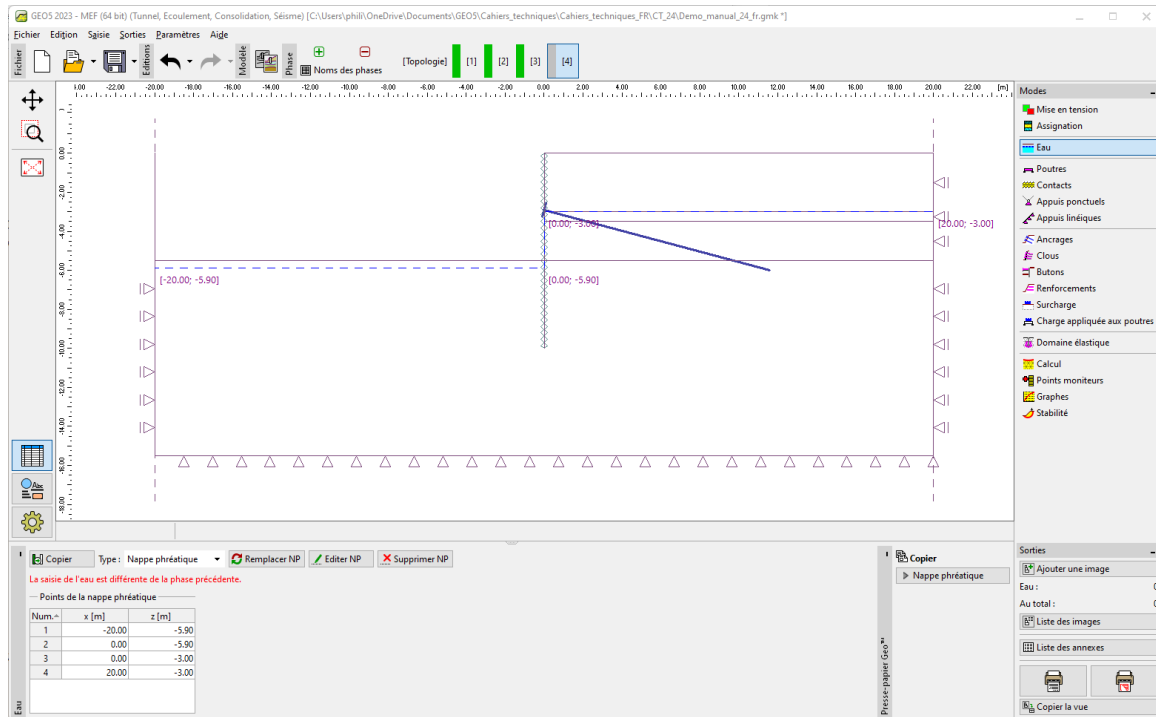


FIGURE 29 – Cadre « Eau » - Phase de construction 3 (modification du niveau de la nappe)

Nous allons maintenant soumettre les calculs de la phase de construction 4 et examiner de nouveau les résultats obtenus .

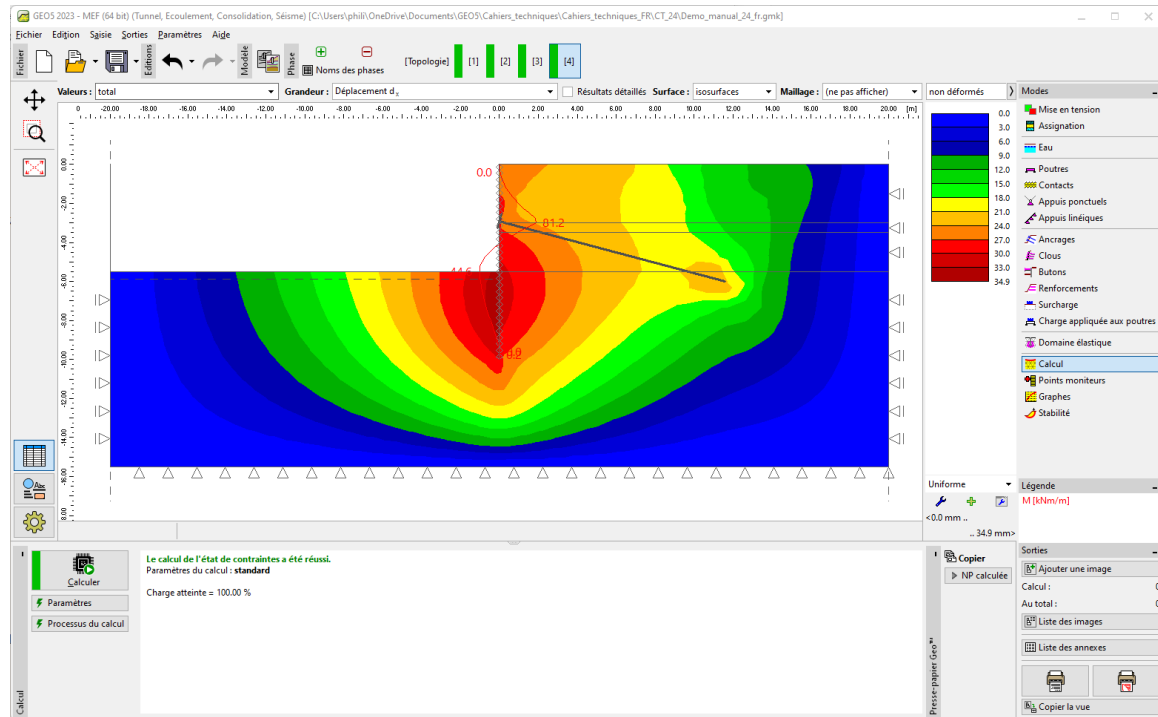


FIGURE 30 – Cadre « Calcul » - Phase de construction 4 (tassement d_x - structure déformée)

Il résulte de cette figure que le déplacement latéral maximal au voisinage de la paroi de pal-planches est de 35 mm.

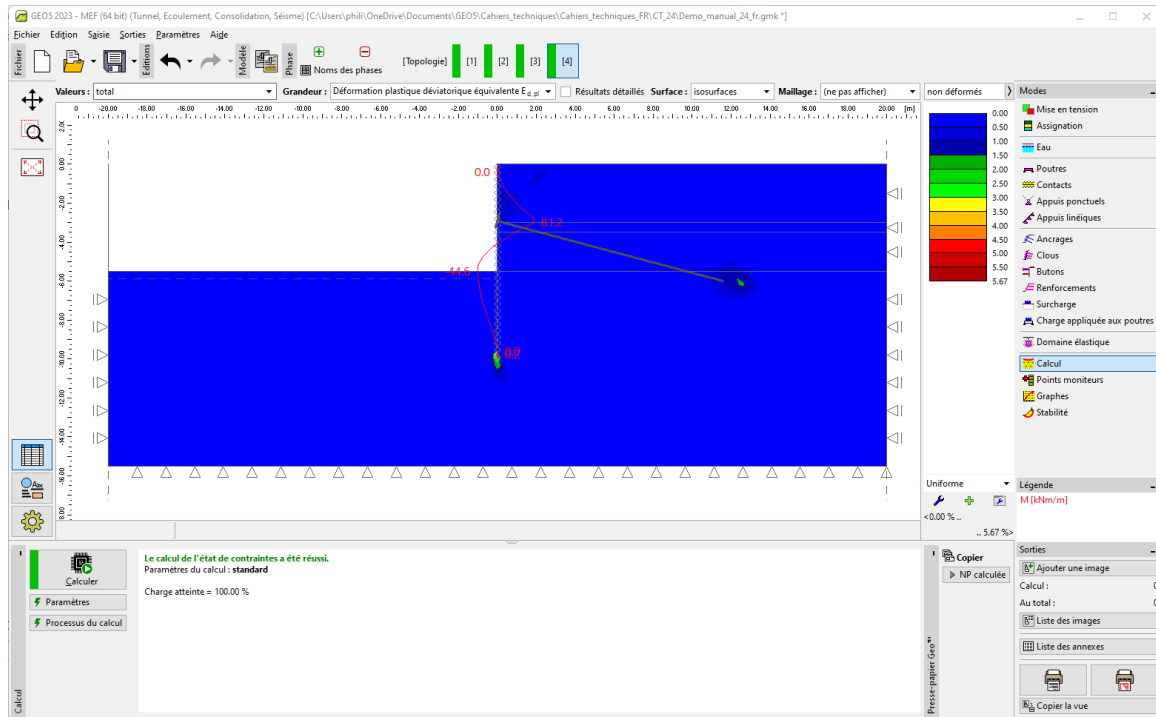


FIGURE 31 – Cadre « Calcul » - Phase de construction 3 (déformation plastique déviatorique équivalente $\varepsilon_{d,pl}$)

D'après le tracé des déformations plastiques équivalentes, il est évident que la plus grande plastification du sol se produit au voisinage du talon du rideau de palplanches. Dans la phase de construction 2, la plastification du sol était localisée au voisinage de l'emplacement du futur ancrage (pour en savoir plus, consultez l'Aide - F1).

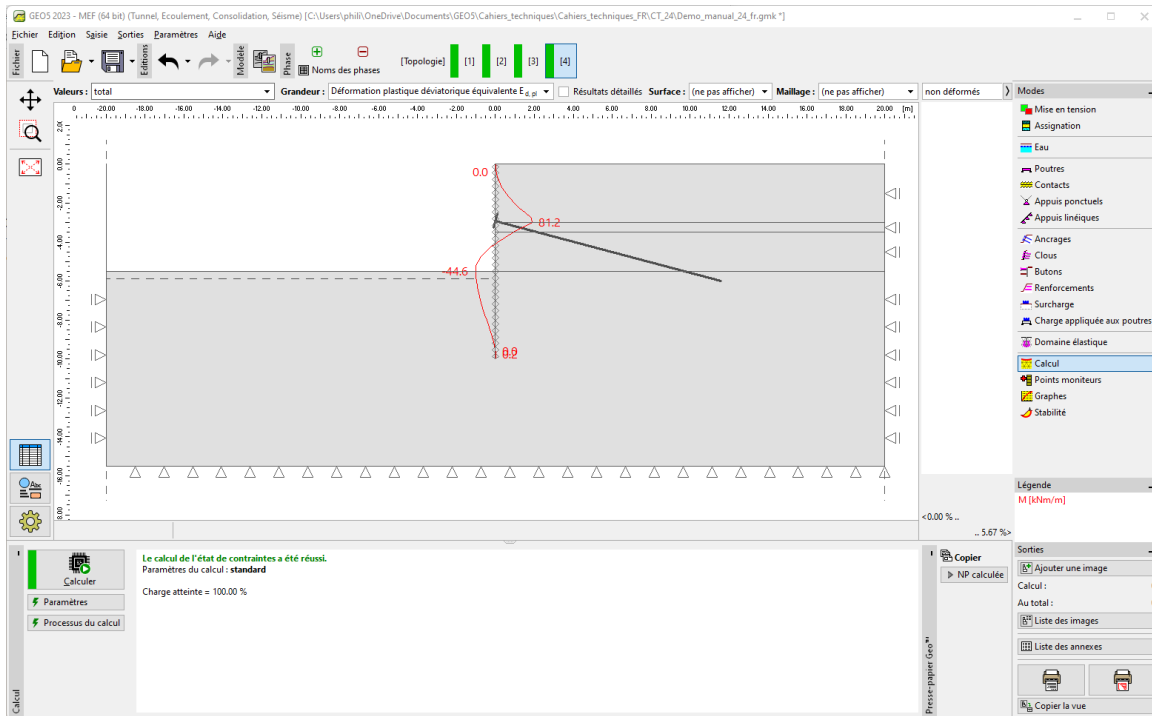


FIGURE 32 – Cadre « Calcul » - Phase de construction 4 (distribution du moment de flexion M)

Nous allons noter les extrema locaux donnés par la courbe des moments de flexion le long de la paroi dans le tableau présenté dans la dernière partie de ce cahier. Nous allons maintenant examiner les résultats pour les moniteurs et déterminer les déformations au niveau de la tête du mur de palplanches.

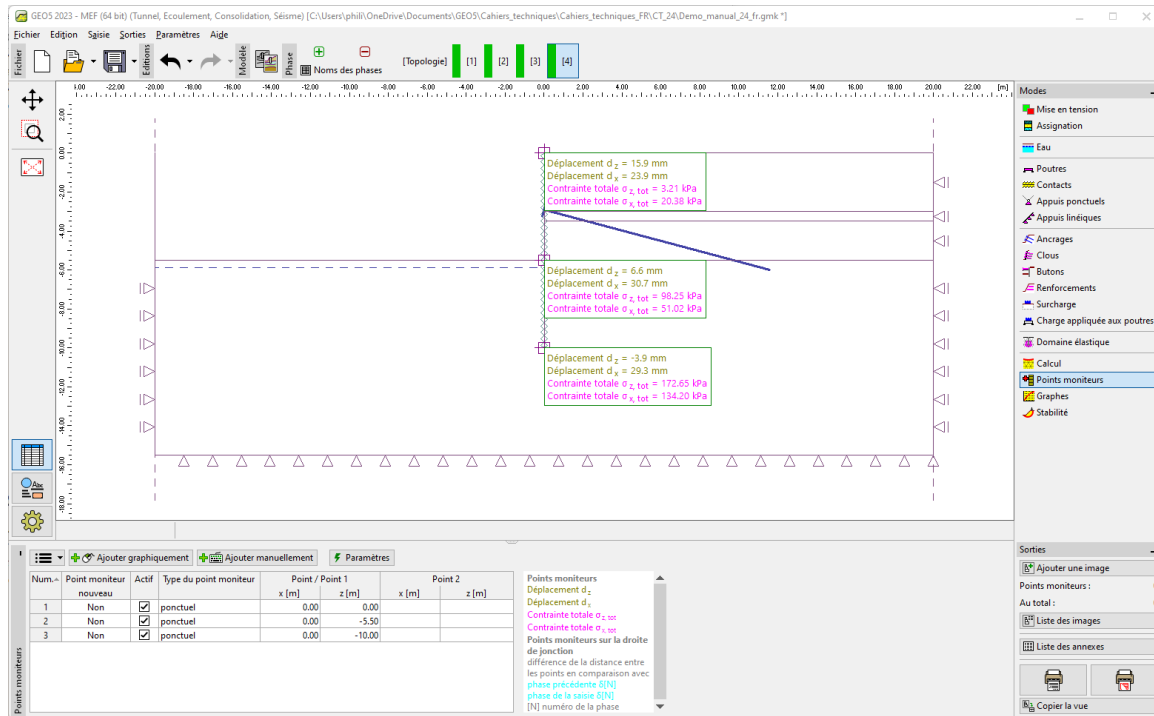


FIGURE 33 – Cadre « Points moniteur » - Phase de construction 3

2.6 Évaluation des résultats

Le tableau ci-dessous restitue les extrema des efforts internes le long de la paroi pour les phases de construction 2 et 3. Ce sont les valeurs des moments de flexion. Nous avons d'abord effectué cette analyse pour le modèle de matériau de Mohr-Coulomb modifié avec une densité de maillage localement augmentée en utilisant l'option de raffinement de ligne. Ensuite, nous les avons comparé ceux obtenus en utilisant le programme GEO5-Vérification des écrans de soutènement.

Modèle de matériau / Programme	Phase 2 M [kNm/m]	Phase 4 - Terrain M [kNm/m]	Phase 4 - Ancrage M [kNm/m]
Mohr-Coulomb modifié	9,6	-49,00	104,4
Vérification du soutènement (solution analytique)	29,16	-28,91	110,57

TABLE 2 – Résumé des résultats - Moments de flexion le long de la structure

Remarques :

1. pour la solution analytique, nous avons considéré le calcul du module de la réaction horizontale du sous-sol selon Schmitt (pour plus de détails, consultez l'Aide - F1). Nous avons défini des paramètres de sol supplémentaires comme suit :

- sol de classe *SM*, moyennement dense :
 - analyse de la pression au repos - sol pulvérulent
 - angle de frottement entre la structure et le sol : $\delta = 17^\circ$
 - module de déformation du sol : $E_{def} = 10 \text{ MPa}$
 - sol de classe *CL*, consistance dure :
 - pression au repos - sol cohérent ($\nu = 0,4$)
 - angle de frottement entre la structure et le sol : $\delta = 14^\circ$
 - module de déformation du sol : $E_{def} = 4,5 \text{ MPa}$
2. nous avons considéré le paramètre d'analyse comme « Standard - États limites ». L'analyse de la pression des terres a été réalisée sans réduire les paramètres du sol. De plus, nous n'avons pas pris en compte la valeur de la pression de dimensionnement minimale (pour plus de détails, consultez l'Aide - F1).

3 Conclusion

Les conclusions suivantes peuvent être tirées des résultats de l'analyse :

1. l'augmentation de la densité locale du maillage d'éléments finis au voisinage des lignes conduit à une détermination plus précise des résultats concernant les efforts internes
2. il est nécessaire pour l'analyse des parois de soutènement d'utiliser des éléments de contact et des modèles de matériaux non linéaires, permettant le développement de déformations plastiques et donnant une image plus fidèle du comportement réel des structures dans le sol environnant
3. les déformations plastiques déviatoriques équivalentes $\varepsilon_{d,pl}$ maximales représentent les emplacements potentiels de rupture (résultant du dépassement de la condition d'élasticité du matériau).