

GEO5

Méthode des éléments finis : Évaluation de la stabilité des pentes

Résumé

L'objectif de ce cahier technique est d'analyser le degré de stabilité de la pente (coefficient de sécurité) à l'aide de la méthode des éléments finis.

Le fichier exemple correspondant est « Demo_manual_25.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 le degré de stabilité d'une pente, d'abord sans l'action d'une surcharge en bande, puis sous l'action d'une telle surcharge d'intensité $q = 35,0 \text{ kN/m}^2$. Le schéma de la géométrie de la pente pour toutes les phases de construction (y compris les points de chaque interface) est illustré sur la figure ci-dessous. Effectuer ensuite la stabilisation de la pente au moyen d'ancrages précontraints.

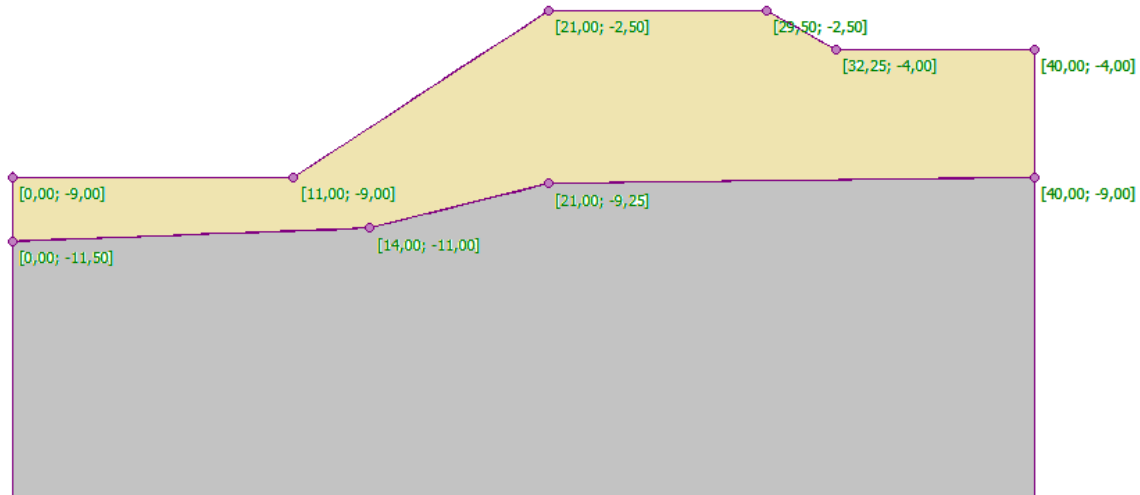


FIGURE 1 – Schéma de la pente à modéliser - Points des interfaces

Le profil géologique se compose de deux types de sols dont les paramètres sont décrits dans le tableau ci-dessous :

Paramètres de sol / Classification	Sol n° 1	Sol n° 2 - R4
Poids volumique du sol : γ [kN/m^3]	18	20
Module d'élasticité : E [MPa]	21	300
Coefficient de Poisson : ν	0,3	0,2
Cohésion du sol : c_{eff} [kPa]	9	120
Angle de frottement interne : φ_{eff} [$^\circ$]	23	38
Angle de dilatance : ψ [$^\circ$]	0	0
Poids volumique saturé : γ_{sat} [kN/m^3]	20	22

TABLE 1 – Tableau des paramètres des sols - Vérification de la stabilité d'une pente

2 Solution

Pour résoudre ce problème, nous allons utiliser le programme GEO5-MEF. La résolution de ce problème étape par étape va suivre le plan suivant :

- Topologie : définition et modélisation du problème (interface, génération de maillage)
- Phase de construction 1 : analyse du coefficient de sécurité de la pente d'origine sans surcharge en bande
- Phase de construction 2 : analyse du coefficient de sécurité de la pente soumise à une surcharge en bande
- Phase de construction 3 : stabilisation de la pente au moyen d'ancrages ; analyse de la stabilité des pentes
- Évaluation des résultats : comparaison, conclusion.

2.1 Topologie : paramétrage du problème

Dans le cadre «Paramètres», nous allons sélectionner l'option « Stabilité des pentes » comme type de calcul, les autres paramètres restant inchangés.

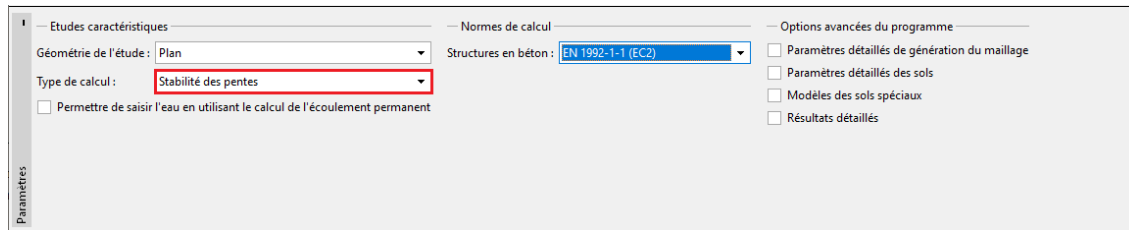


FIGURE 2 – Cadre « Paramètres »

Remarque : le paramétrage et le développement d'un modèle en mode « Stabilité des pentes » est totalement identique au mode « État de contrainte ». L'analyse de la stabilité de la pente est effectuée en cliquant sur le bouton « Calcul ». Les analyses de stabilité des pentes à chaque phases de construction sont complètement indépendantes les unes des autres (pour plus de détails, consultez l'Aide - F1).

A 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 aux limites. Pour notre problème, nous allons fixer les dimensions du modèle à (0 m; 40 m) et la profondeur du point d'interface le plus bas à 10 m.

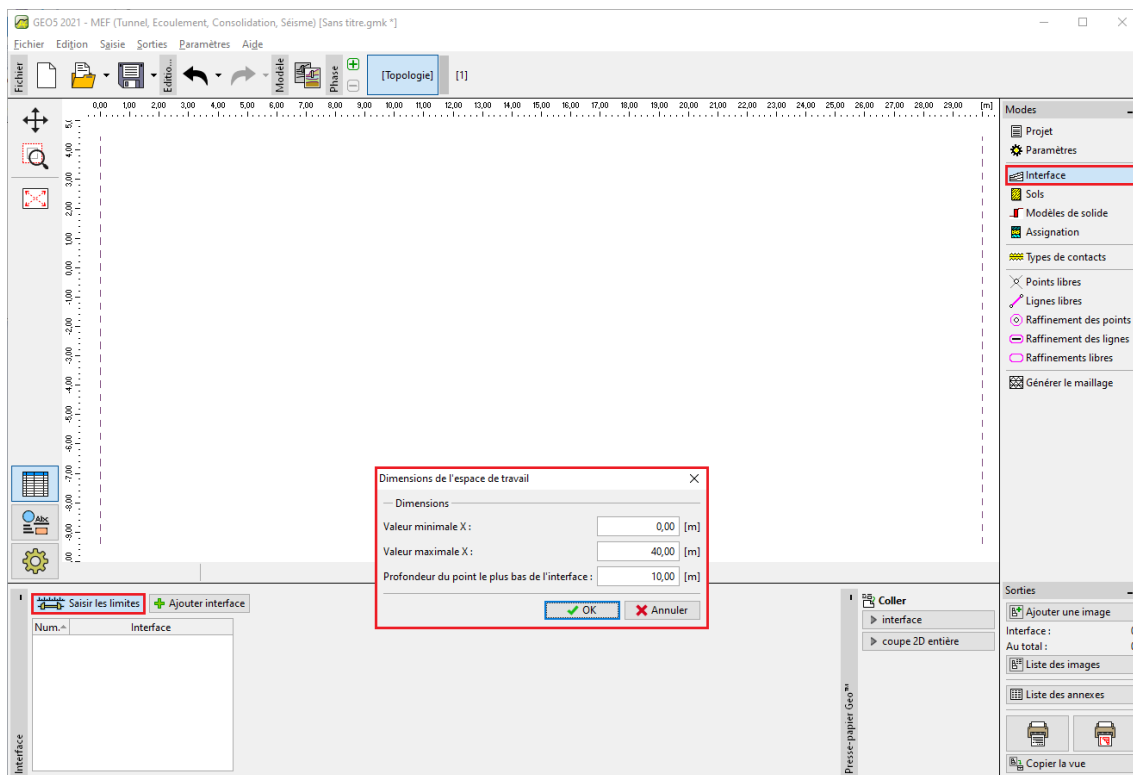


FIGURE 3 – Fenêtre de dialogue « Dimensions de l'espace de travail »

Ensuite, nous allons définir les points des interfaces de couches de sol en utilisant le tableau suivant.

	Interface 1		Interface 2	
	x [m]	z [m]	x [m]	z [m]
1	0,00	-9,00	0,00	-11,50
2	11,00	-9,00	14,00	-11,00
3	21,00	-2,50	21,00	-9,25
4	29,50	-2,50	40,00	-9,00
5	32,25	-4,00		
6	40,00	-4,00		

TABLE 2 – Liste des points des interfaces

Nous allons maintenant définir les paramètres des sols et ensuite assigner ces sols aux interfaces précédemment définies. Nous allons choisir le modèle de Drucker-Prager (*cf.* remarque ci-dessous). Nous considérerons l'angle de dilatance entre les deux couches de sol ψ comme nul, *i.e.* que le matériau ne change pas de volume lorsqu'il est exposé à une contrainte de cisaillement (pour plus de détails, consultez l'Aide - F1).

Remarques :

1. *pour une analyse de stabilité des pentes, il convient de choisir un modèle de sol non linéaire, qui suppose le développement de déformations plastiques et est formulé sur la base des paramètres de résistance des sols c et φ . Dans ce cas particulier, nous avons choisi le modèle de matériau de Drucker-Prager, en raison de la réponse plus souple de la structure par rapport au modèle classique de Mohr-Coulomb (pour plus de détails, consultez l'Aide - F1)*
2. *une comparaison entre les résultats obtenus à l'aide de différents modèles de matériaux non linéaires est présentée dans le tableau à la fin de ce cahier technique.*

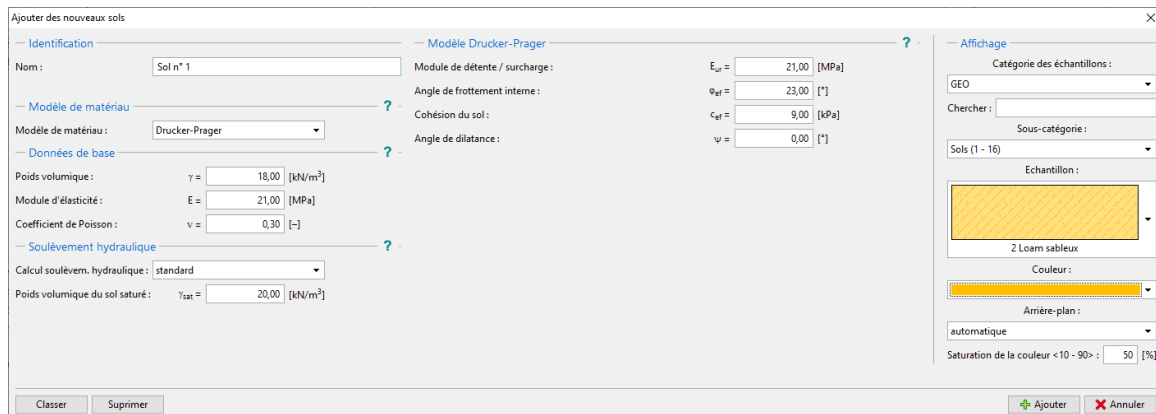


FIGURE 4 – Fenêtre de dialogue « Ajouter des nouveaux sols » - Sol n° 1

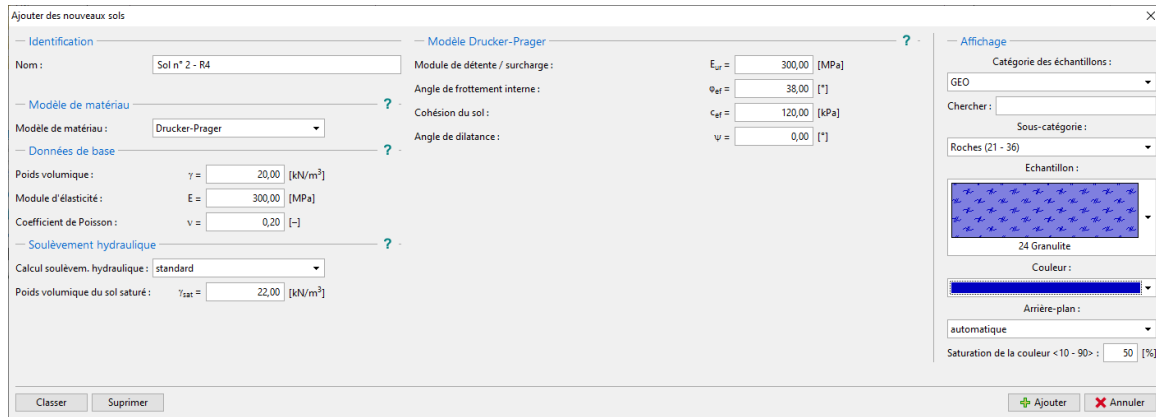


FIGURE 5 – Fenêtre de dialogue « Ajouter des nouveaux sols » - Sol n° 2 - R4

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

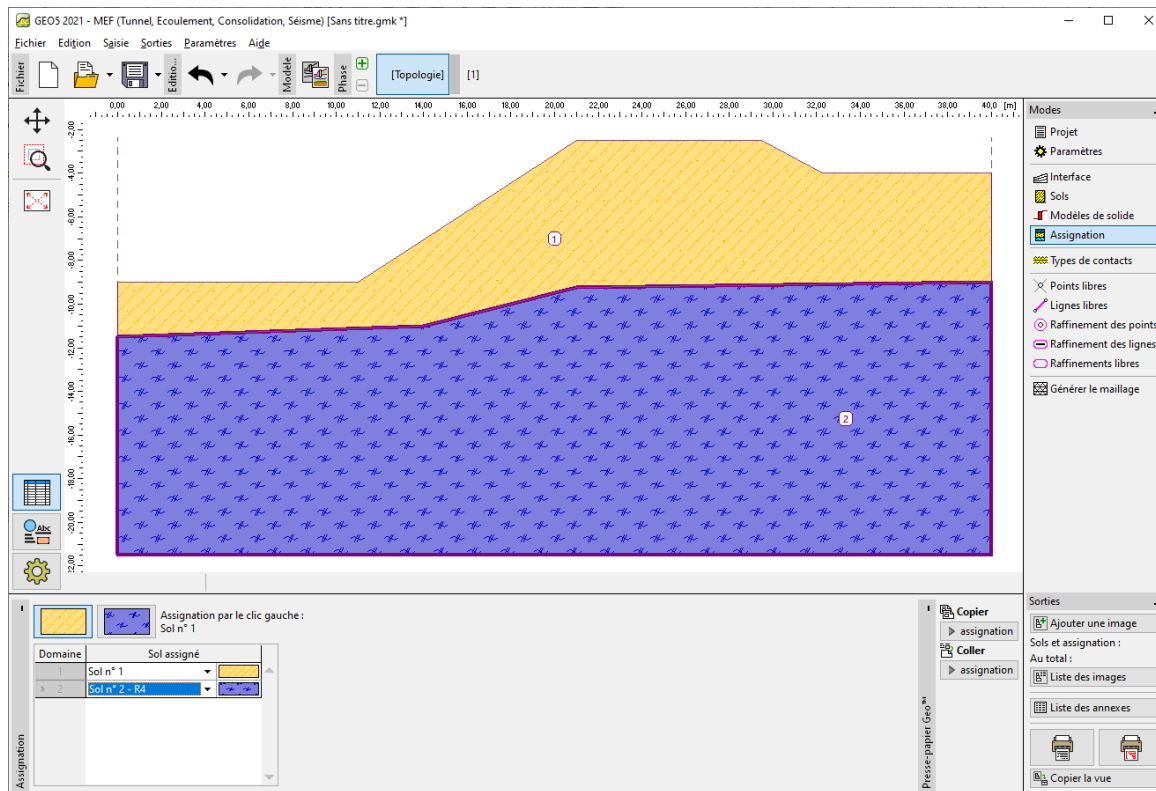


FIGURE 6 – Cadre « Assignation »

La dernière étape du processus de définition de la topologie est la génération du maillage par éléments finis. La densité du maillage affecte significativement le degré de stabilité résultant (coefficient de sécurité) et il convient donc de toujours choisir un maillage suffisamment fin.

Pour cet exemple particulier, nous allons choisir une longueur d'arête de 1,5 m et générer le maillage (en cliquant sur le bouton « Générer »). Le tableau à la fin de ce cahier donne les résultats obtenus avec le programme GEO5-FEM pour des longueurs de 1,0 m, 1,5 m et 2,0 m.

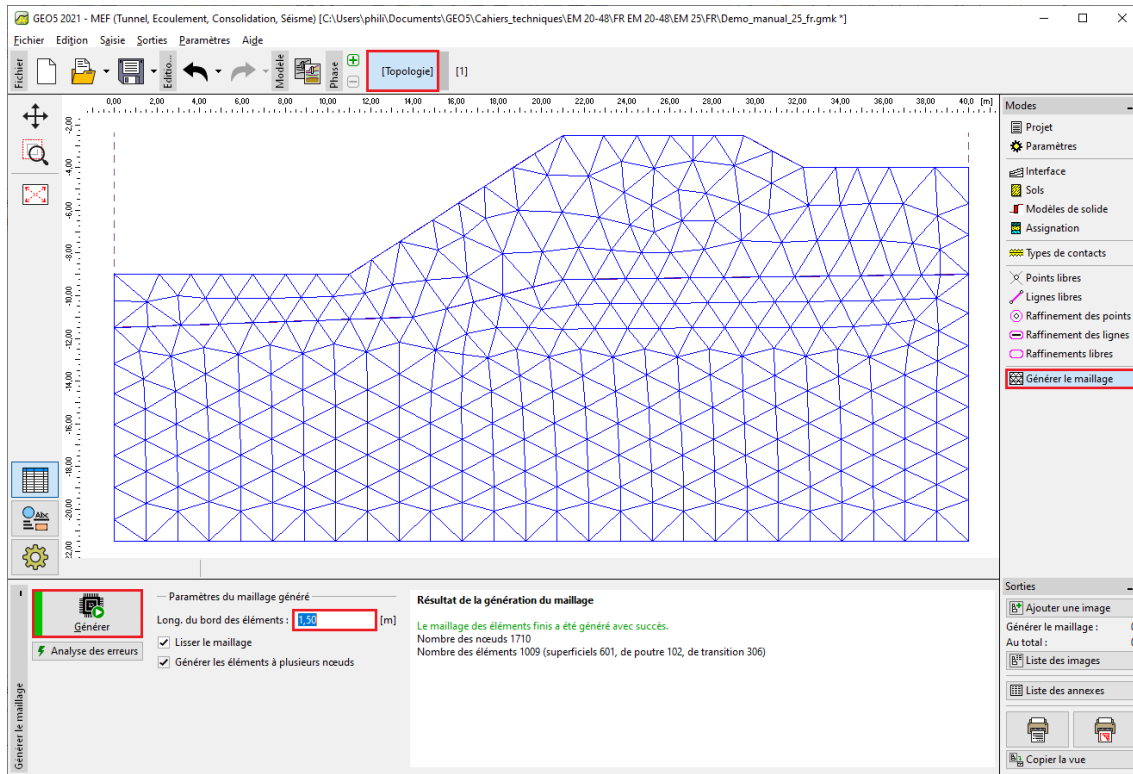


FIGURE 7 – Cadre « Générer le maillage » - Longueur du bord de l'élément de 1,5 m

2.2 Phase de construction 1 : analyse du degré de stabilité (coefficient de sécurité)

Après avoir généré le maillage d'éléments finis, nous allons passer à la phase de construction 1 et soumettre les calculs (en cliquant sur le bouton « Calculer »). Nous conserverons le paramètre de calcul « Standard ».

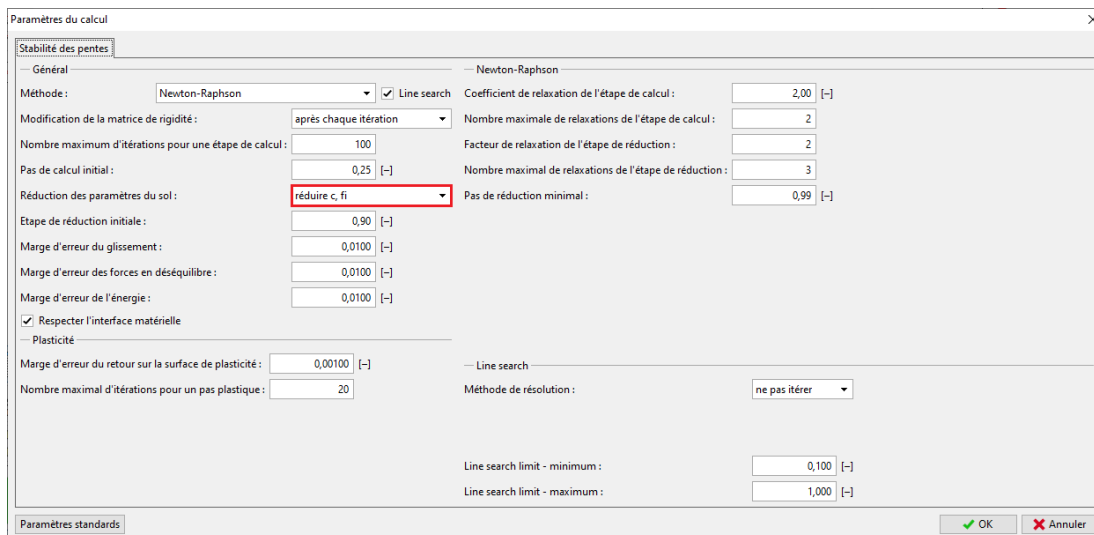


FIGURE 8 – Fenêtre de dialogue « Paramètres de calcul »

Remarque : l'analyse de la stabilité des pentes en elle-même est basée sur la **réduction des paramètres c et φ liés à la résistance du sol**. Le coefficient de sécurité est défini dans le cadre de cette méthode comme un paramètre à appliquer pour réduire les valeurs réelles des paramètres c et φ conduisant à une perte de stabilité (pour plus de détails, consultez l'Aide - F1). Le degré de stabilité de la pente est défini dans le programme par la relation :

$$FS = \frac{\tan \varphi^s}{\tan \varphi^p}$$

où :

- φ^s : valeur réelle de l'angle de frottement interne
- φ^p : valeur de l'angle de frottement interne au moment de la rupture.

Pour une analyse pertinente de la stabilité, il convient de visualiser les vecteurs déplacements ainsi que la déformation plastique déviatorique équivalente $\varepsilon_{d,pl}$. Les déformations plastiques montrent la forme et l'ampleur de la surface de rupture potentielle (cf. illustration ci-dessous).

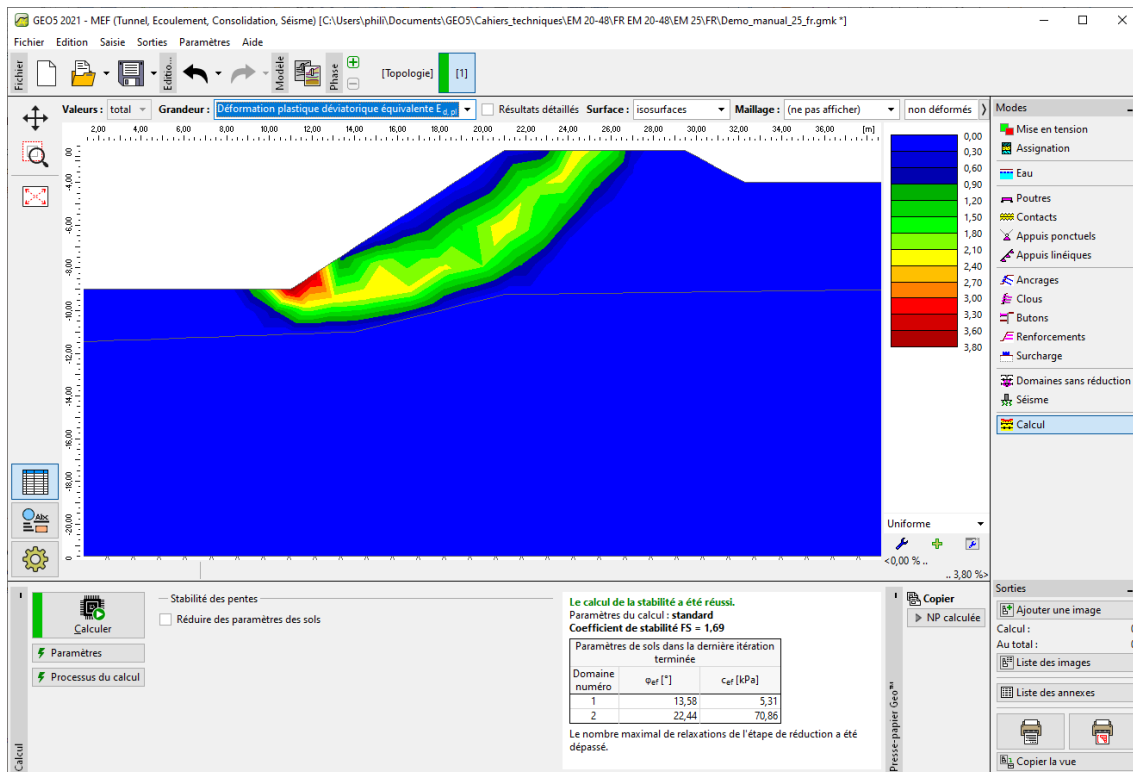


FIGURE 9 – Cadre « Calcul » - Phase de construction 1 (déformation plastique déviatorique équivalente $\varepsilon_{d,pl}$)

Remarque : le mode « Stabilité » du programme permet de ne tracer que les déplacements (dans les directions X et Z) et les déformations (totales ou plastiques). La déformation de la structure correspond à l'état du calcul pour les paramètres réduits des sols, elle n'a donc rien à voir avec la déformation réelle - elle ne donne qu'une image du comportement de toute la pente au moment de la rupture (pour en savoir plus, consultez l'Aide - F1).

2.3 Phase de construction 2 : ajout de la surcharge et analyse

Dans cette phase de construction, nous allons d'abord passer au cadre « Surcharge » pour définir les paramètres suivants - les caractéristiques et l'intensité de la surcharge.

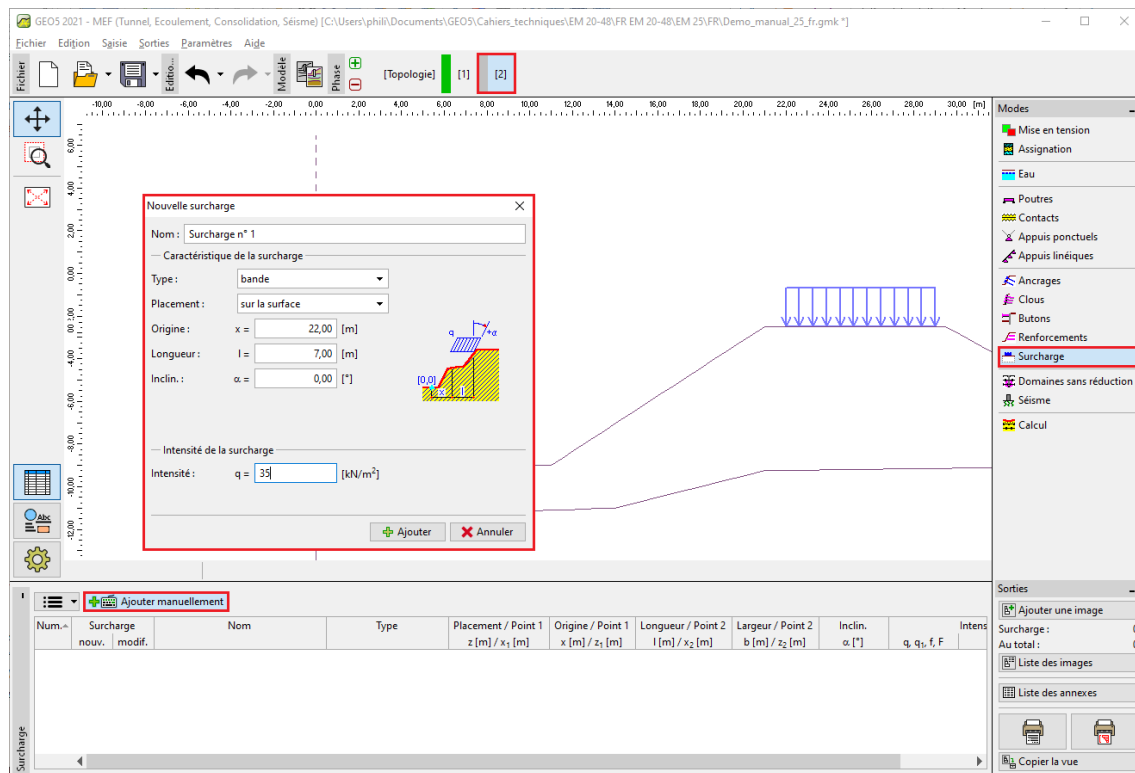


FIGURE 10 – Fenêtre de dialogue « Nouvelles surcharges » - Phase de construction 2

Nous allons maintenant soumettre l'analyse de la phase 2 et examiner les déformations plastiques déviatoriques équivalentes.

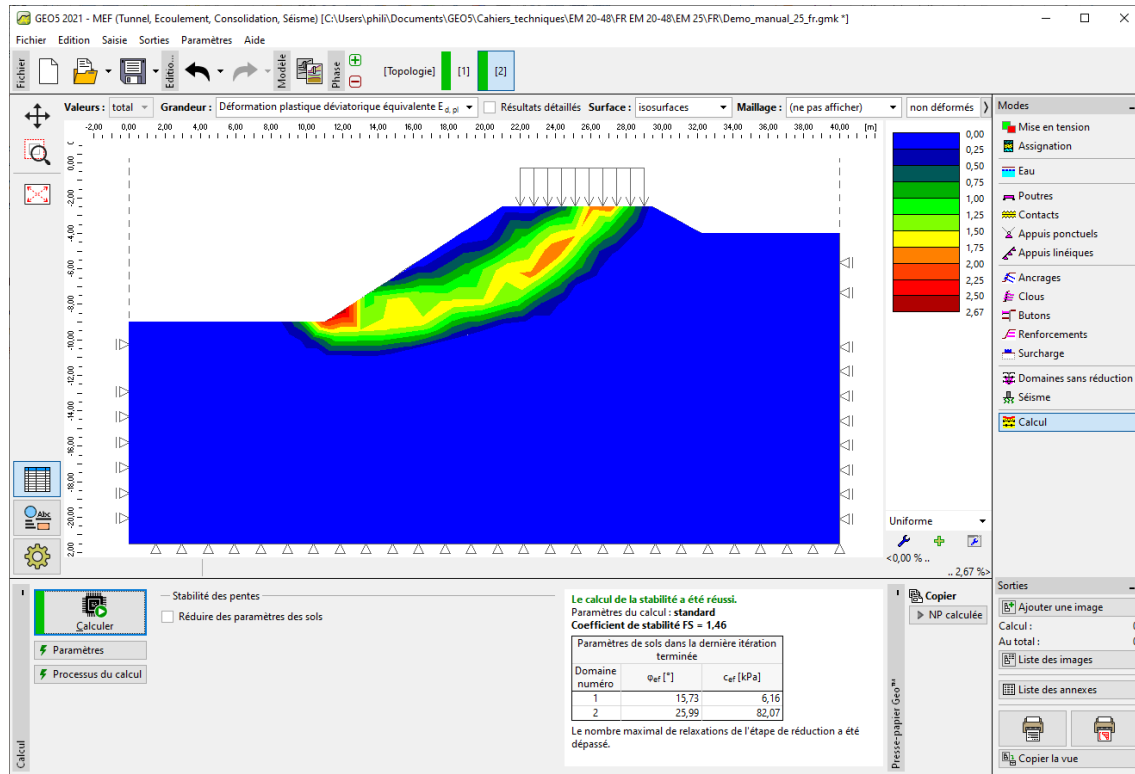


FIGURE 11 – Cadre « Calcul » - Phase de construction 2 (déformation plastique déviatorique équivalente $\varepsilon_{d,pl}$)

2.4 Phase de construction 3 : stabilisation de la pente par des ancrages et analyse

Nous allons ajouter la phase de construction 3. Ensuite, en cliquant sur le bouton « Ajouter » du cadre « Ancrages », nous allons placer une rangée d'ancrages en acier ayant une force de précontrainte fixée à $F = 50 \text{ kN}$, pour cela nous allons valoriser les données de la fenêtre de dialogue « Nouveaux ancrages » en considérant les paramètres suivants :

- longueur de l'ancrage : $l = 16 \text{ m}$
- inclinaison de l'ancrage : $\alpha = 17^\circ$
- diamètre de l'ancrage : $d = 20 \text{ mm}$
- espacement inter-ancrage : $b = 1 \text{ m}$.

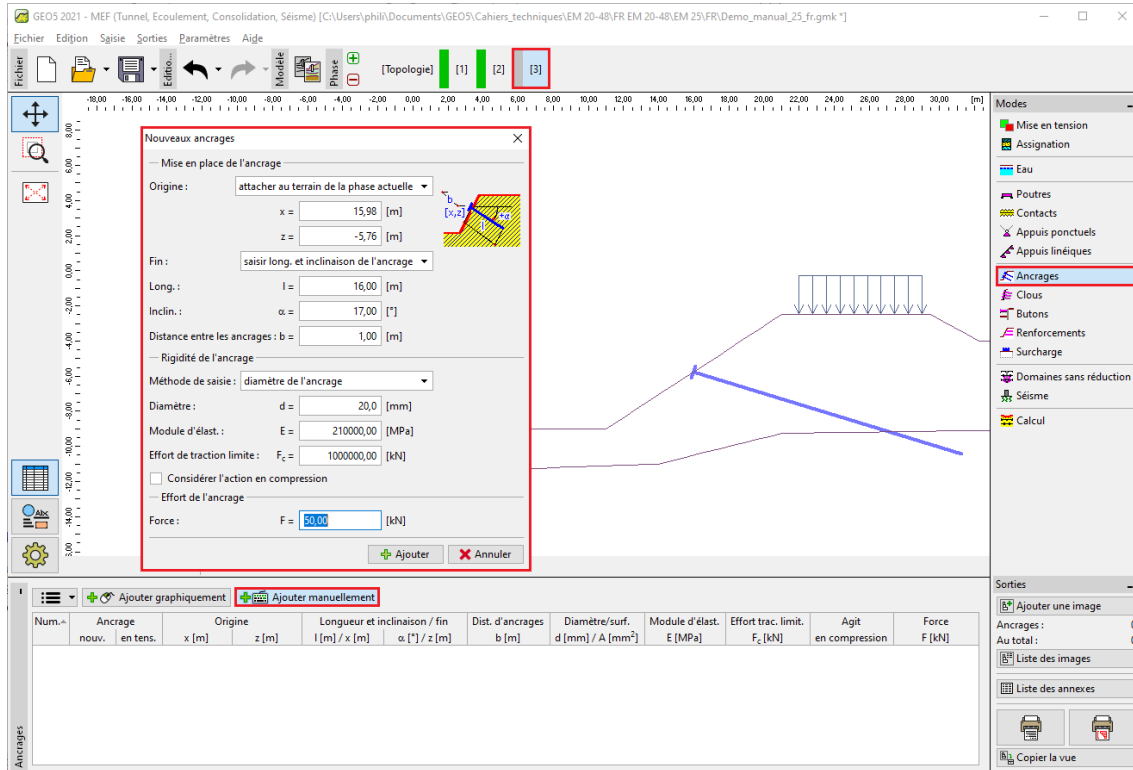


FIGURE 12 – Fenêtre de dialogue « Nouveaux ancrages » - Phase de construction 3

Remarque : les ancrages précontraints entrent dans le calcul de stabilité des pentes comme une surcharge induite par la force agissant au niveau de la tête d'ancrage - la rigidité de l'ancrage n'a donc aucun effet sur la stabilité. Cependant, le sol au niveau de la tête d'ancrage peut se plastifier. Il convient donc une fois l'analyse terminée de vérifier la localisation et l'objectivité des déformations plastiques représentant la surface de glissement. Si le sol sous la tête d'ancrage se plastifie, il est nécessaire de modifier le modèle (pour plus de détails, consultez l'Aide - F1).

Les autres paramètres d'entrée restant inchangés, nous allons maintenant soumettre les calculs de l'étape de construction 3 et examiner les résultats comme à l'étape de construction précédente.

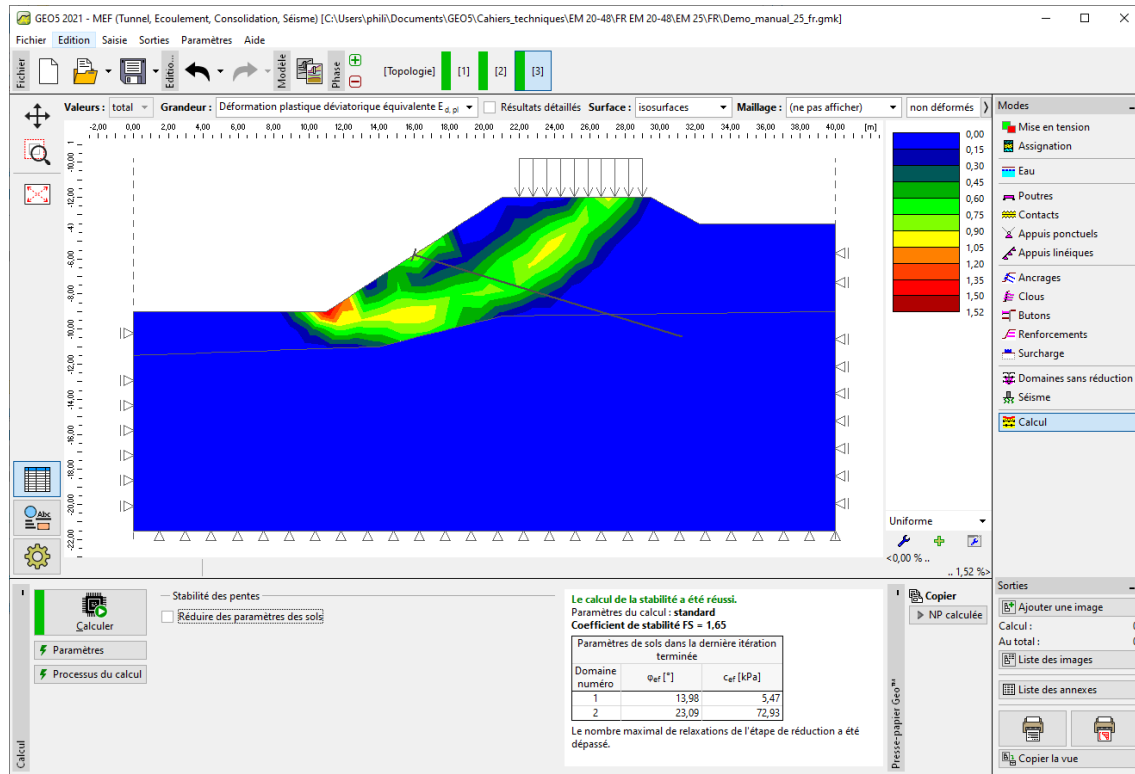


FIGURE 13 – Cadre « Calcul » - Phase de construction 3 (déformation plastique déviatorique équivalente $\varepsilon_{d,pl}$)

Cette étape conclut les analyses initiales. Nous allons stocker les résultats associé au degré de stabilité de la pente dans un tableau récapitulatif; nous allons maintenant refaire les calculs en utilisant les modèles de matériaux : Mohr-Coulomb (MC) et Mohr-Coulomb modifié (MCM).

Remarque : la vérification de la forme de la surface de glissement est très importante dans certains cas, car une rupture locale de la structure peut se produire même dans des régions différentes de celles attendues (pour plus de détails, consultez l'Aide - F1). La figure ci-dessous montre l'évolution de la zone plastique localisée de sol au voisinage de la tête d'ancrage au cours de l'analyse avec la densité de maillage de 1,0m pour le modèle de Drucker-Prager (DP). Si un tel cas se produit, il est raisonnable de modifier le modèle de structure en suivant par exemple les recommandations suivantes :

- augmenter la longueur d'arête de l'élément de maillage,
- introduire un sol avec des paramètres de résistance c et φ plus élevés au niveau de la tête d'ancrage,
- définir les éléments de poutre au niveau de la tête d'ancrage (la répartition de la charge dans le sol sera améliorée)
- utiliser des régions sans réduction (plus d'informations - cahier technique n° 35).

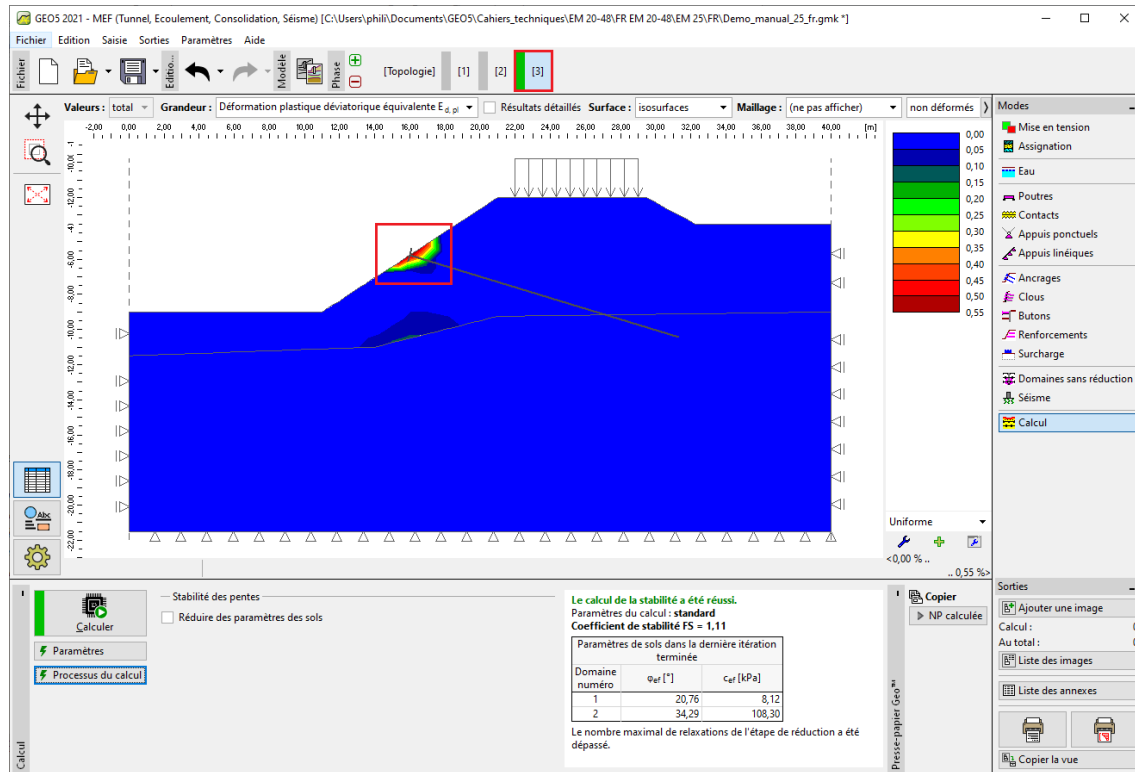


FIGURE 14 – Cadre « Calcul » - Phase de construction 3 (plasticité localisée du sol sous la tête d'ancrage, modèle DP avec maille de 1,0 m)

2.5 Évaluation des résultats

Le tableau ci-dessous présente les résultats du calcul degré de stabilité de la pente (coefficient de sécurité) pour chaque phases de construction. Nous avons effectué le calcul pour certains modèles de matériaux non linéaires dans le programme GEO5-MEF et différentes densités de maillage d'éléments finis. A titre de comparaison, nous présentons également les résultats obtenus par GEO5-Stabilité des pentes (selon Bishop et Spencer).

Modèle de matériau	Espacement b [m]	Phase 1 <i>FS</i>	Phase 2 <i>FS</i>	Phase 3 <i>FS</i>	Remarques
DP	1,0	1,65	1,42	1,11	Le sol sous la tête d'ancrage se plastifie
DP	1,5	1,69	1,46	1,65	
DP	2,0	1,69	1,48	1,69	
MC	1,0	1,52	1,35	1,07	Le sol sous la tête d'ancrage se plastifie
MC	1,5	1,56	1,37	1,52	
MC	2,0	1,58	1,39	1,56	
MCM	1,0	1,76	1,54	1,21	Le sol sous la tête d'ancrage se plastifie
MCM	1,5	1,81	1,58	1,76	
MCM	2,0	1,83	1,58	1,81	
Bishop (solution analytique)	-	1,51	1,33	1,47	<i>cf. remarque infra</i>
Spencer (solution analytique)	-	1,51	1,32	1,52	<i>cf. remarque infra</i>

TABLE 3 – Résumé des résultats - Degré de stabilité de la pente (coefficient de sécurité)

Remarque : concernant les solutions analytiques obtenues grâce au programme GEO5-Stabilité des pentes, nous avons utilisé les paramètres de calcul « Standard - Coefficients de sécurité ». Nous avons effectué les calculs en utilisant dans un premier temps la méthode de Bishop puis celle de Spencer avec l'optimisation d'une surface de glissement circulaire (sans limitation).

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 conduit à des résultats plus précis, malheureusement la durée du calcul pour chaque phase de construction s'en trouve aussi rallongée
2. Il est nécessaire que les analyses utilisent des modèles de matériaux non linéaires, permettant le développement de déformations plastiques.
3. les déformations plastiques déviatoriques équivalentes $\varepsilon_{d,pl}$ maximale indiquent l'emplacement d'une surface de rupture de glissement potentielle.