

GEO5

Stabiliser une pente à l'aide de pieux stabilisateurs

Résumé

L'objectif de ce cahier technique est de montrer comment utiliser les programmes GEO5 « Stabilité des pentes » et « Pieux stabilisateurs » dans le cadre de la modélisation d'une pente supportant une route puis de simuler l'amélioration de sa stabilité par adjonction de pieux stabilisateurs.

Le fichier exemple correspondant est « Demo_manual_19.gst ».

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

Les pieux stabilisateurs sont utilisés pour stabiliser les grands glissements de terrain. Cette structure est similaire à la paroi de pieux, qui est entièrement (ou presque entièrement) réalisée dans la pente. Ce mur de pieux croise une surface de glissement et aide à prévenir d'autres glissements de terrain. Les pieux ont généralement une grande section circulaire ou carrée.

La pente, que nous voulons stabiliser à l'aide de pieux stabilisateurs, doit répondre à plusieurs conditions. Tout d'abord, nous devons connaître l'emplacement de la surface de glissement (sa profondeur sous le terrain à l'emplacement futur des pieux). Une autre chose importante est l'état de la roche (sol) sous la surface de glissement. Elle ne doit être ni érodé ni altéré, car elle doit transférer la surcharge des pieux.

La résolution du problème peut être divisée en deux étapes. Premièrement, nous devons analyser la stabilité globale de la pente. Pour cette étape, nous utiliserons le programme GEO5 « Stabilité des pentes ». Grâce à ce programme, nous obtiendrons les forces qui doivent agir sur les pieux pour répondre au critère de sécurité requis. Si nous ne connaissons pas la position exacte de la surface de glissement (par exemple à partir de levé géotechnique), nous pouvons la déterminer grâce à ce programme en utilisant l'optimisation. L'optimisation peut trouver la plus mauvaise position de surface de glissement (c'est-à-dire, la plus critique ayant le coefficient de sécurité le plus bas). La deuxième partie de la solution fera appel au programme « Pieux stabilisateurs ». Ce programme permettra de concevoir et d'évaluer les pieux. Le résultat de cette analyse sera la répartition des efforts internes ainsi que déplacement horizontal des pieux.

Ce cahier technique propose d'illustrer étape par étape l'utilisation de tels pieux afin de stabiliser une pente supportant une route comme le montre la photographie ci-dessous.



FIGURE 1 – Pieux stabilisateurs (tous sous le terrain)

2 Spécification de l'étude

Concevez une solution de stabilisation de pente en utilisant des pieux stabilisateurs selon le schéma ci-dessous. Le coefficient de sécurité de stabilité globale de la pente doit être d'au moins $SF = 2,0$. Considérez cette stabilisation comme une situation de conception permanente.

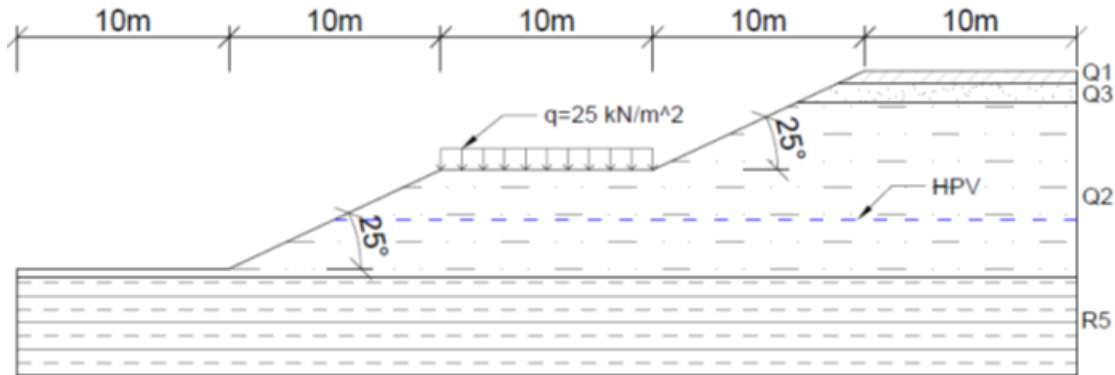


FIGURE 2 – Géométrie de la pente

| Couches | Profondeur [m] | CSN 73 1001 | γ/γ_{sat} [kN/m³] | φ_{ef} [°] | c_{ef} [kPa] | E_{def} [MPa] | ν [-] |
|---------------------------------------|----------------|-------------|-------------------------------|--------------------|----------------|-----------------|-----------|
| Silt de faible plasticité F5/ML0 (Q1) | 0,0 - 0,6 | F5/ML | 21 / 22 | 20 | 14 | 4 | 0,4 |
| Sable argileux (Q3) | 0,6 - 1,5 | F4/CS | 18,5 / 19,5 | 26 | 4 | 8 | 0,35 |
| Argile sableuse (Q2) | 1,5 - 9,72 | S5/SC | 18 / 18,5 | 22 | 5 | 5 | 0,35 |
| Ardoise fortement érodée (R5) | 9,72 - 17 | R5 | 24 / 24,2 | 29 | 30 | 15 | 0,35 |

TABLE 1 – Paramètres des sols

La nappe phréatique se trouve à une profondeur de 7 m.

3 Solution

La première partie de la solution consiste à modéliser l'ensemble de l'étude dans le programme GEO5 « Stabilité des pentes ». Le processus de modélisation en utilisant ce programme est déjà illustré dans le cahier technique n° 8 (Analyse de la stabilité des pentes). Pour cette raison, seules les parties liées à l'analyse des pieux stabilisateurs sont décrites ici.

3.1 Évaluation de la pente existante - phase de construction 1

Tout d'abord, modifiez les paramètres de base de l'étude à l'aide du bouton « Édition » du cadre « Paramètres ». Sélectionnez la méthode de vérification « coefficient de sécurité » et augmentez la valeur du coefficient de sécurité à $SF_s = 2,0$.

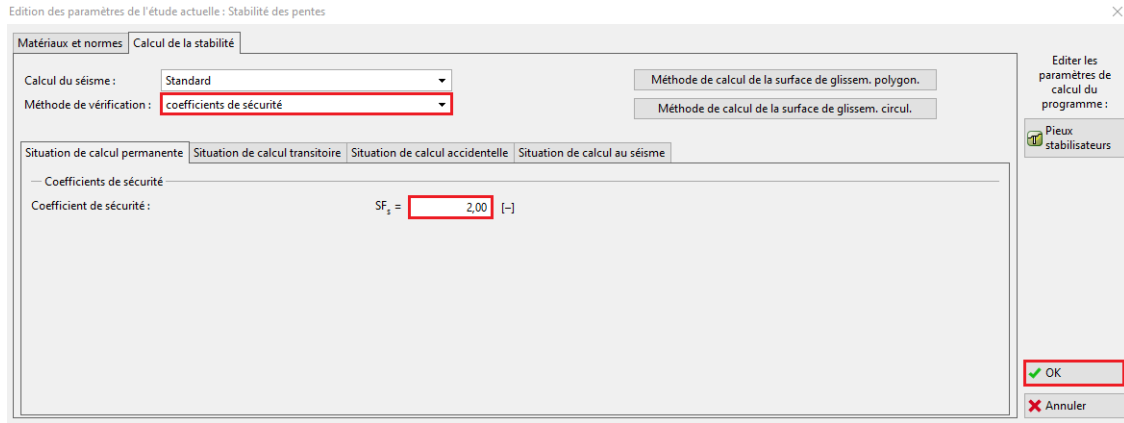


FIGURE 3 – Cadre « Paramètres »

Dans le cadre « Interface », définissez les plages et modélisez la forme du terrain et les interfaces entre les couches géologiques en utilisant les coordonnées de chaque point. Les coordonnées des points sont décrites dans le tableau ci-dessous :

| Interface 1 | | | Interface 2 | | | Interface 3 | | | Interface 4 | | | | | | |
|-------------|---|-------|-------------|---|---|-------------|------|---|-------------|-------|------|---|---|-------|-------|
| ➤ | 1 | 0,00 | 0,00 | ➤ | 1 | 38,71 | 8,72 | ➤ | 1 | 36,78 | 7,82 | ➤ | 1 | 0,00 | -0,40 |
| | 2 | 10,00 | 0,00 | | 2 | 50,00 | 8,72 | | 2 | 50,00 | 7,82 | | 2 | 50,00 | -0,40 |
| | 3 | 20,00 | 4,66 | | | | | | | | | | | | |
| | 4 | 30,00 | 4,66 | | | | | | | | | | | | |
| | 5 | 36,78 | 7,82 | | | | | | | | | | | | |
| | 6 | 38,71 | 8,72 | | | | | | | | | | | | |
| | 7 | 40,00 | 9,32 | | | | | | | | | | | | |
| | 8 | 50,00 | 9,32 | | | | | | | | | | | | |

FIGURE 4 – Coordonnées des interfaces

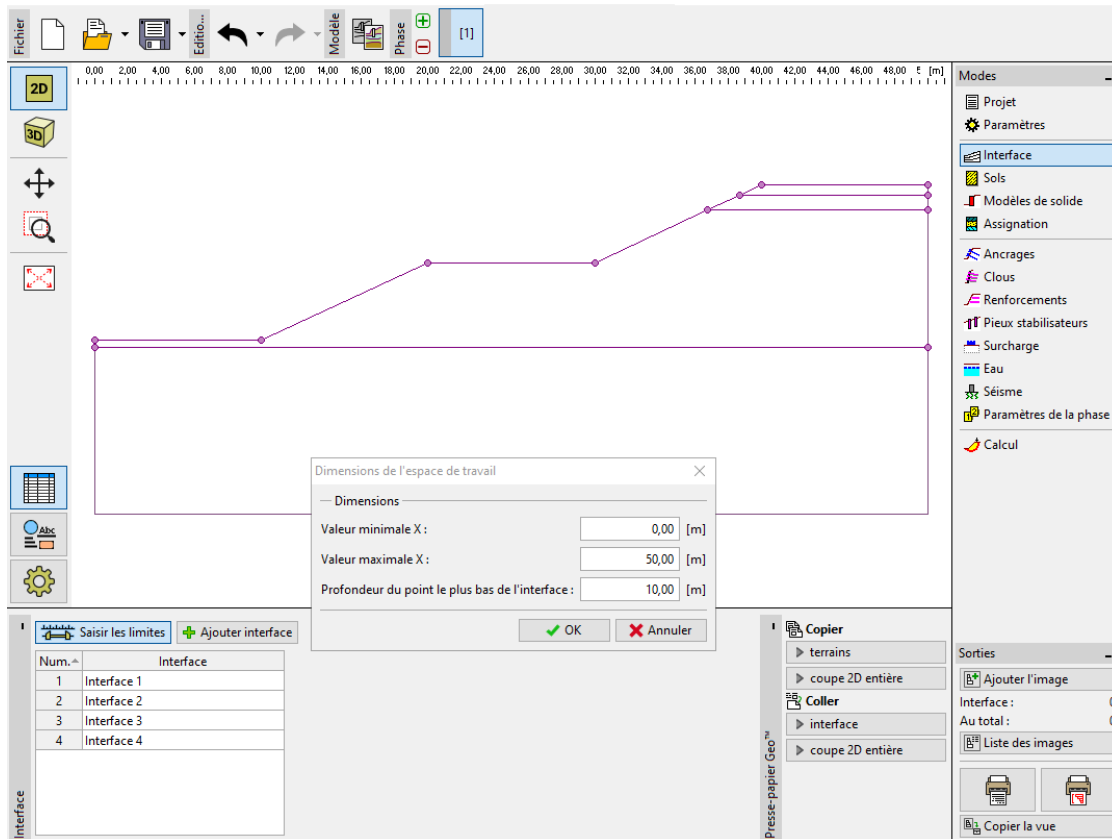


FIGURE 5 – Cadre « Interface » - Dimensions de l'espace de travail

À présent, nous allons saisir les sols conformément à la spécification de l'étude.

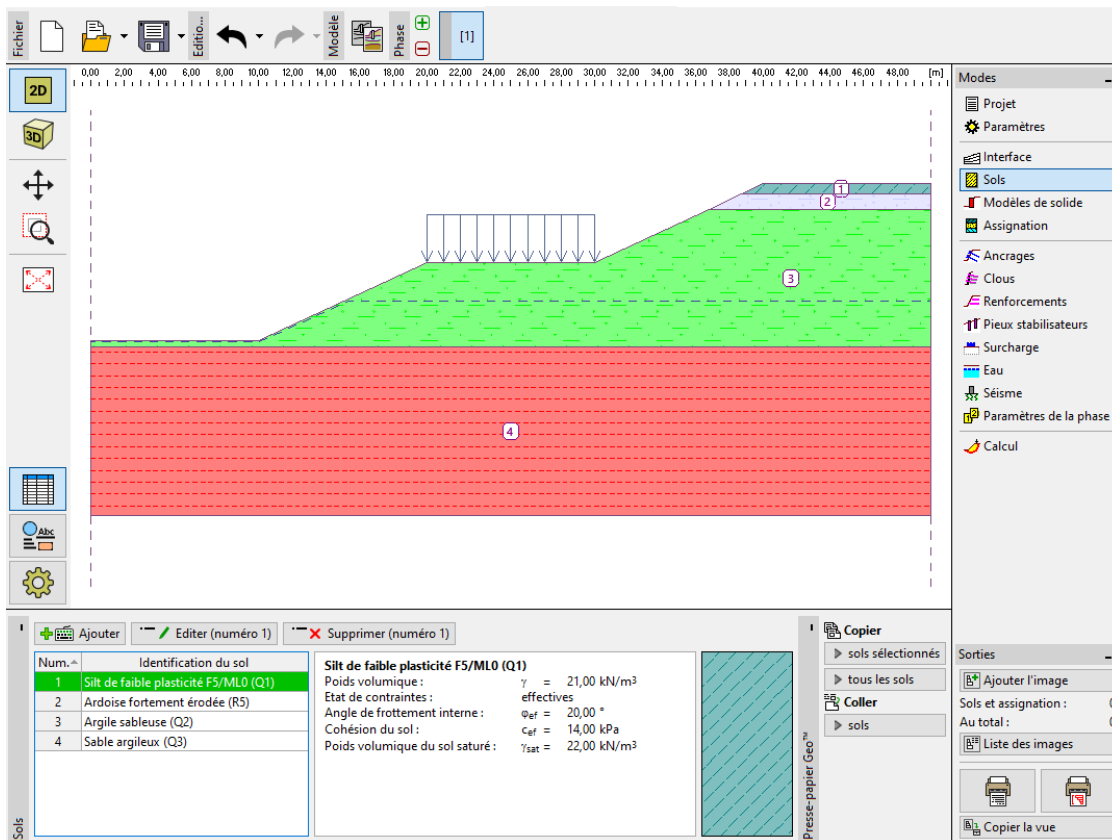


FIGURE 6 – Cadre « Sols »

Dans le cadre « Assignment », assignez les sols ajoutés aux couches géologiques.

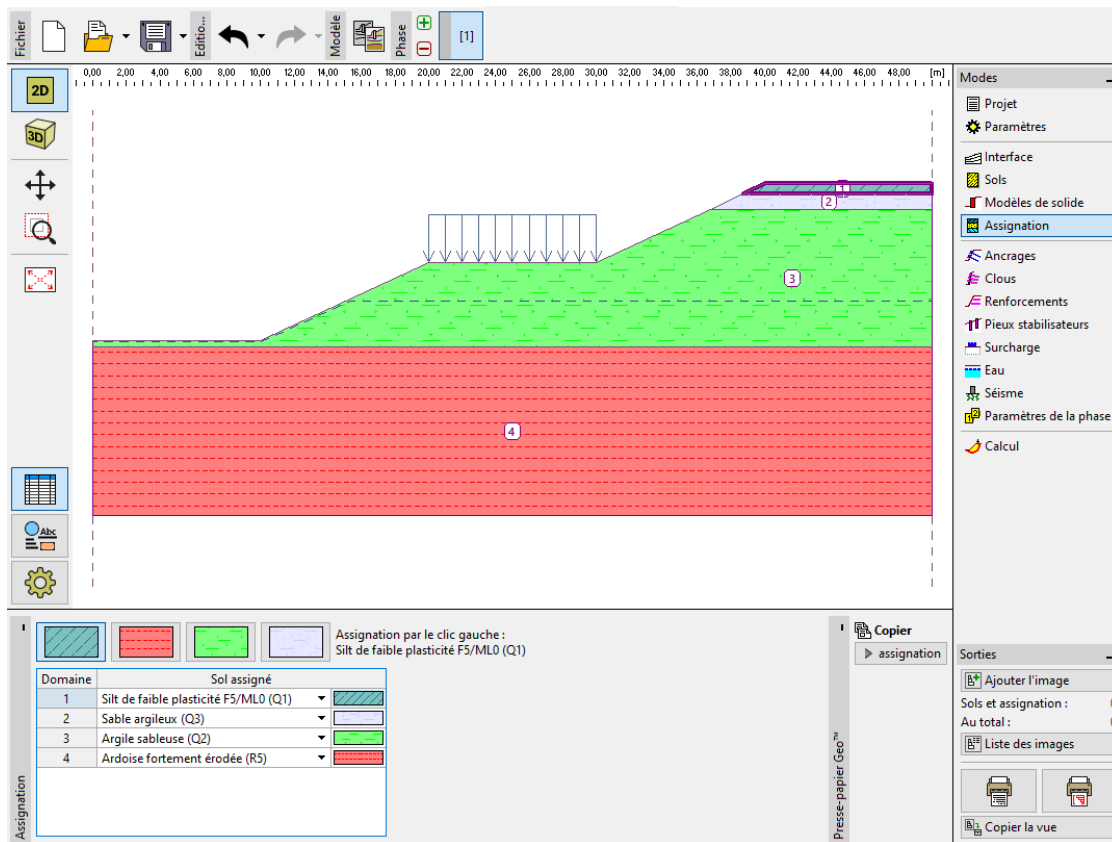


FIGURE 7 – Cadre « Assignment »

L'étape suivante correspond à la définition de la surcharge de la route. Elle agit comme une surcharge permanente (constante) de type « bande » et d'intensité $q = 25 \text{ kPa}$.

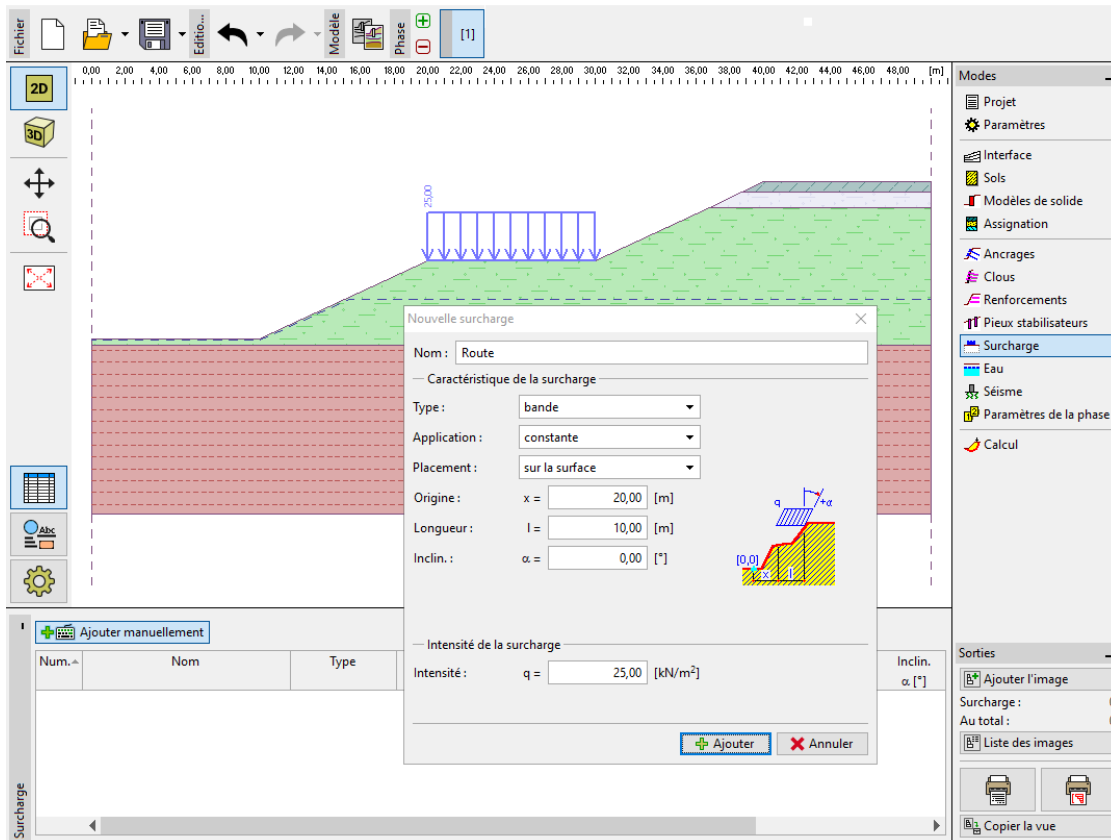


FIGURE 8 – Cadre « Surcharge »

Dans le cadre « Eau », ajoutez les coordonnées des points de la nappe phréatique.

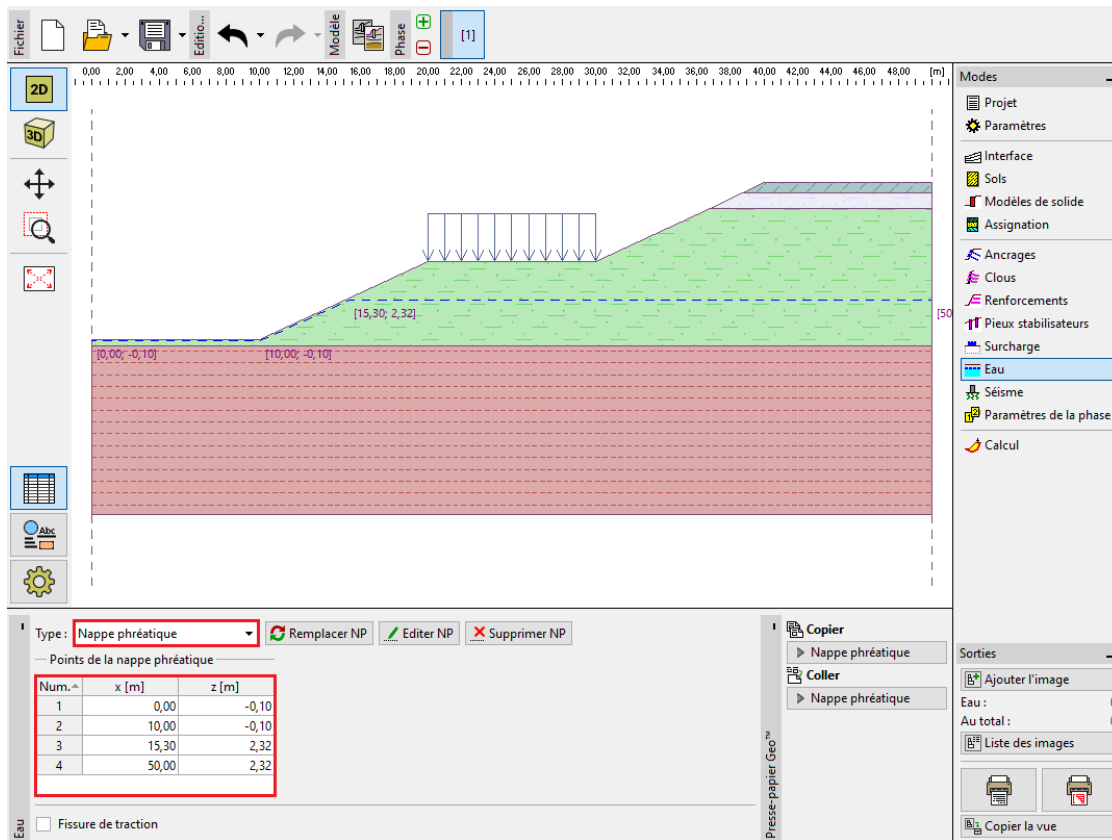


FIGURE 9 – Cadre « Eau »

Nous recherchons une solution à long terme, la situation de calcul (dans le cadre « Paramètres de la phase ») est donc considérée comme « permanente ».

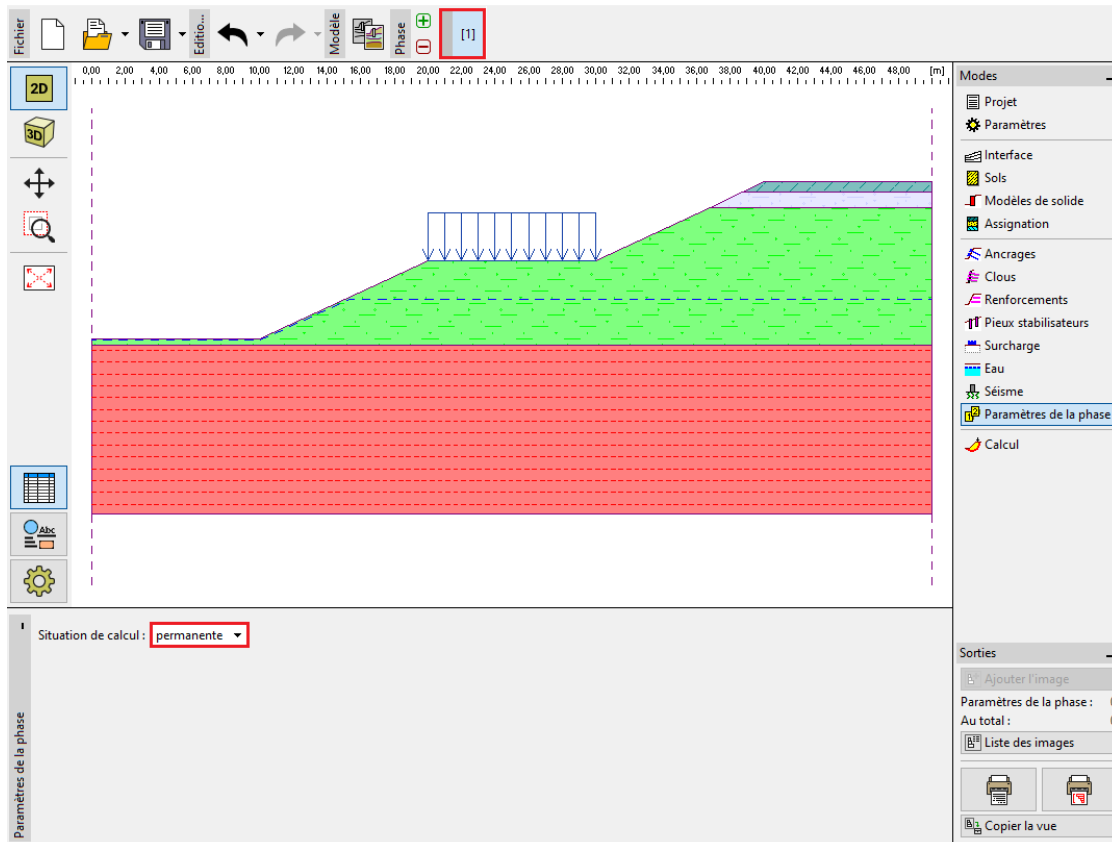


FIGURE 10 – Cadre « Paramètres de la phase »

Passez maintenant au cadre « Calcul ». Le programme propose différentes méthodes d'analyse de stabilité des pentes, le cahier technique n° 8 « Analyse de la stabilité des pentes » en propose un comparatif en les mettant en œuvre dans un cas d'étude.

Nous allons évaluer la stabilité globale de la pente. Comme l'évaluation des parties inférieures et supérieures de la pente n'est pas l'objet de l'étude, nous allons définir des lignes de limitation sur le terrain de la pente. Cela signifie que la surface de glissement globale sera déterminée lors de l'optimisation.

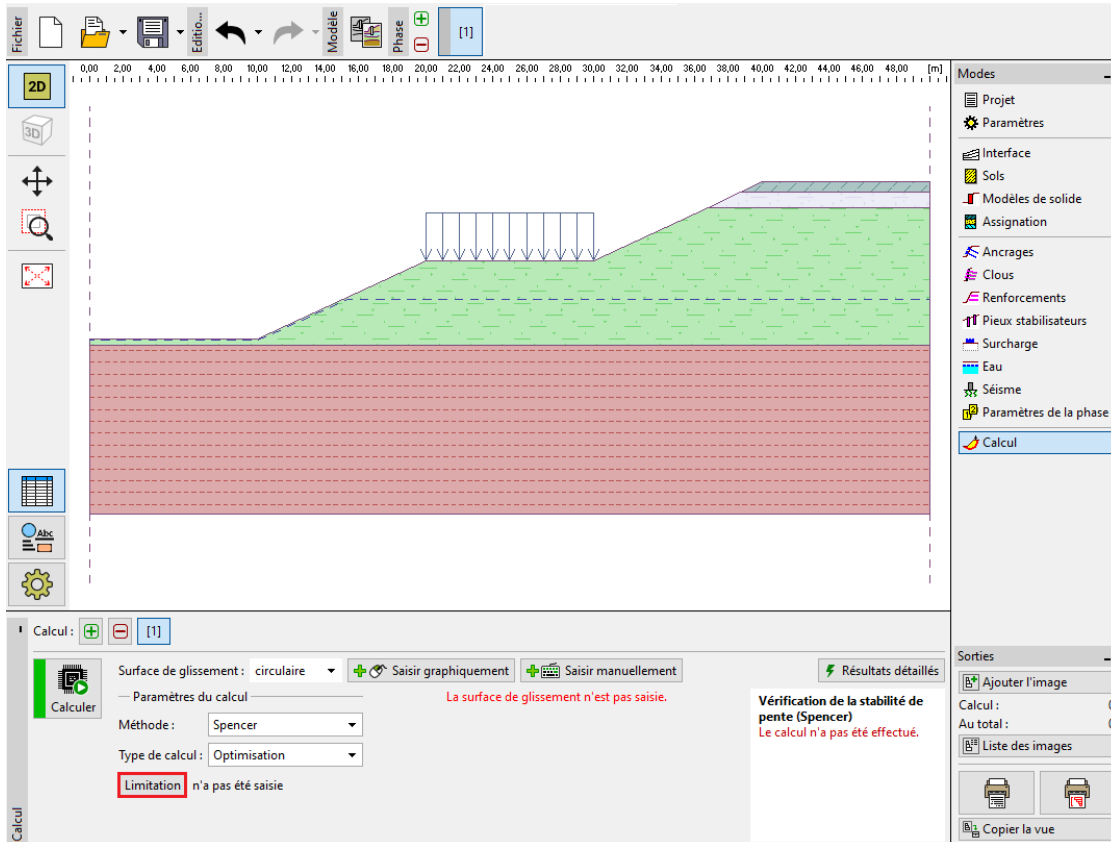


FIGURE 11 – Cadre « Calcul » - Limitations

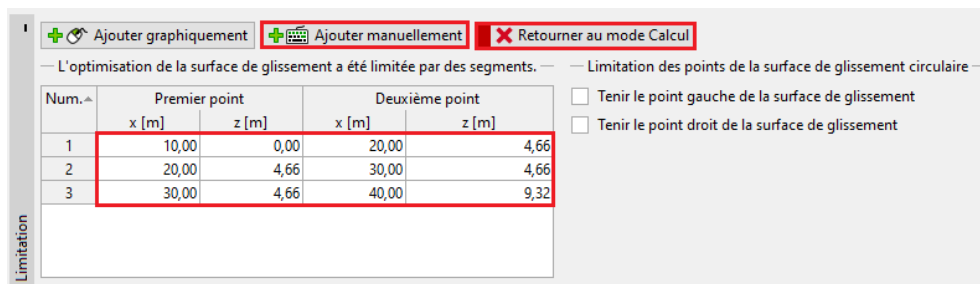


FIGURE 12 – Saisie des limitations

Choisissez la méthode d'analyse de Spencer pour une surface de glissement circulaire optimisée et définissez une surface de glissement initiale de forme quelconque. Le processus d'optimisation se chargera de trouver la surface de glissement la plus défavorable.

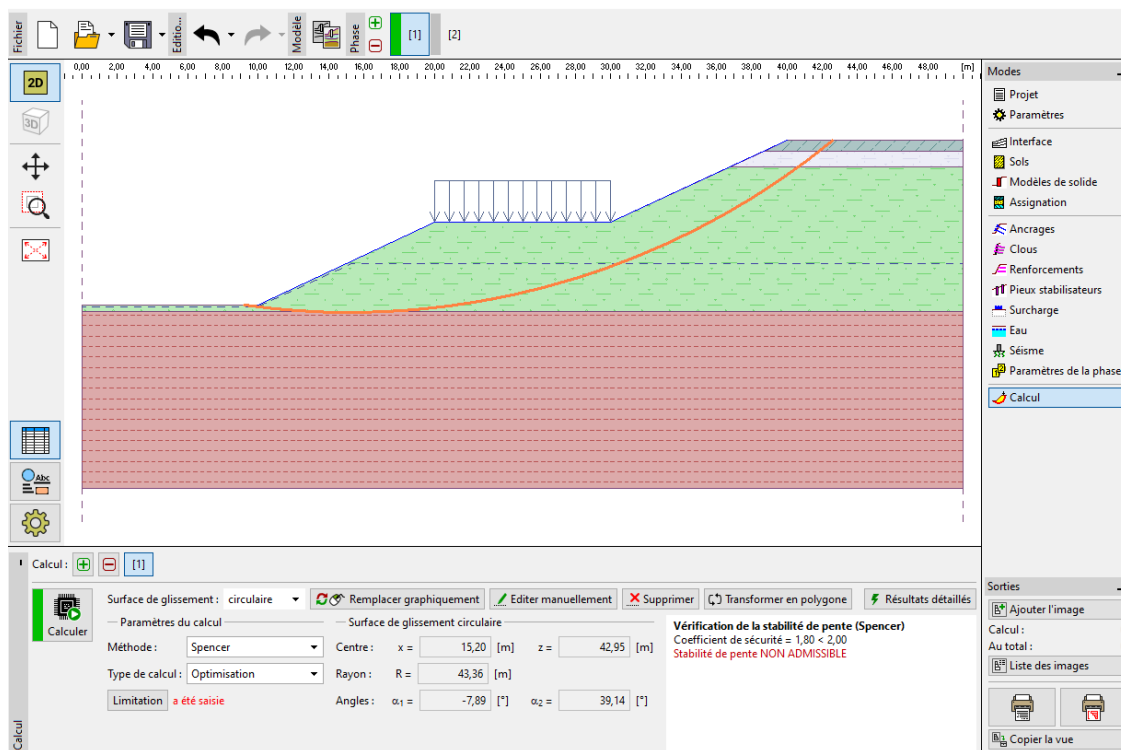


FIGURE 13 – Cadre « Calcul »

Remarques :

1. Il est nécessaire de connaître les forces agissant sur les pieux pour la prochaine étape. Toutes les méthodes ne peuvent pas être utilisées pour analyser ces forces dans le programme de stabilité des pentes. L'utilisateur doit utiliser l'une de ces méthodes suivantes :
 - Spencer
 - Janbu
 - Morgenstern-Price
 - ITFM
2. Le choix de la méthode de calcul et de la forme de la surface de glissement appartient au concepteur et dépend de ses connaissances et de son expérience. Dans la pratique, il est bon d'effectuer plusieurs analyses en utilisant différentes méthodes et de comparer les résultats.
3. Si vous connaissez la position exacte de la surface de glissement, n'utilisez pas l'option d'optimisation. Choisissez « standard » comme « Type de calcul » et saisissez manuellement la surface de glissement.

3.2 Conception des pieux stabilisateurs

Avant de commencer la conception, créez une nouvelle phase de construction. Cela nous permettra de comparer les résultats avec et sans pieux.

Le cadre « Pieux stabilisateurs » permet d'ajouter les pieux de deux façons différentes, soit graphiquement à la souris, soit manuellement en saisissant les coordonnées de la tête de pieu et sa longueur. Il est également possible de combiner ces deux façons : faire une ébauche en utilisant le mode graphique, puis utiliser le mode manuel pour fixer la position exacte des pieux.

Remarque : la position idéale pour insérer un pieu stabilisateur n'est habituellement pas connue. Le pieu doit toujours croiser une surface de glissement et il doit descendre jusque dans les couches géologiques de plus grande capacité portante. Il est également important de considérer les possibilités technologiques de réalisation ou d'ancrage des pieux. Un pieu au milieu d'une pente raide peut améliorer sa stabilité mais la question est de savoir comment le réaliser.

Dans notre exemple, nous avons deux possibilités pour insérer les pieux, comme le montre l'illustration ci-dessous :

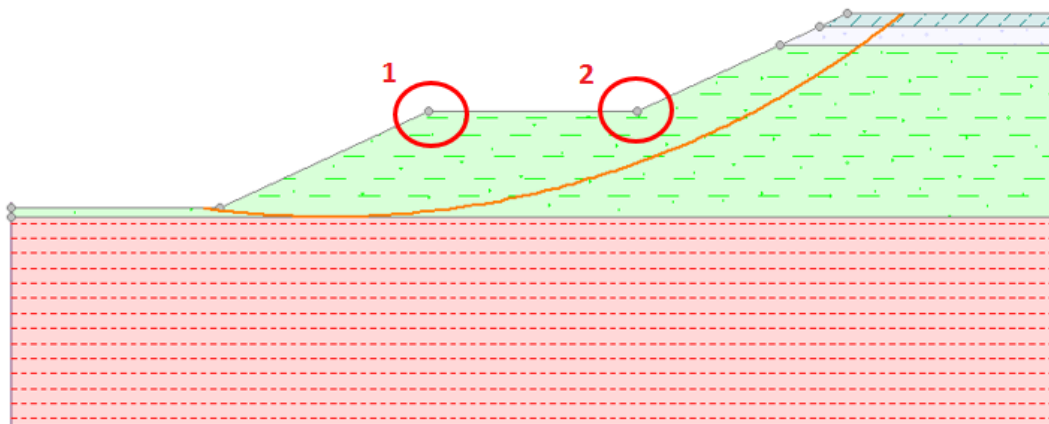


FIGURE 14 – Emplacements possibles pour la réalisation des pieux stabilisateurs

La solution exposée ici correspond à l'emplacement 1. La décision concernant l'emplacement des pieux appartient toujours au concepteur.

Remarque : dans le cas de pieux subissant une surcharge ou d'une réduction de la section des pieux, il est également possible de réaliser les pieux en deux rangées (aux deux emplacements).

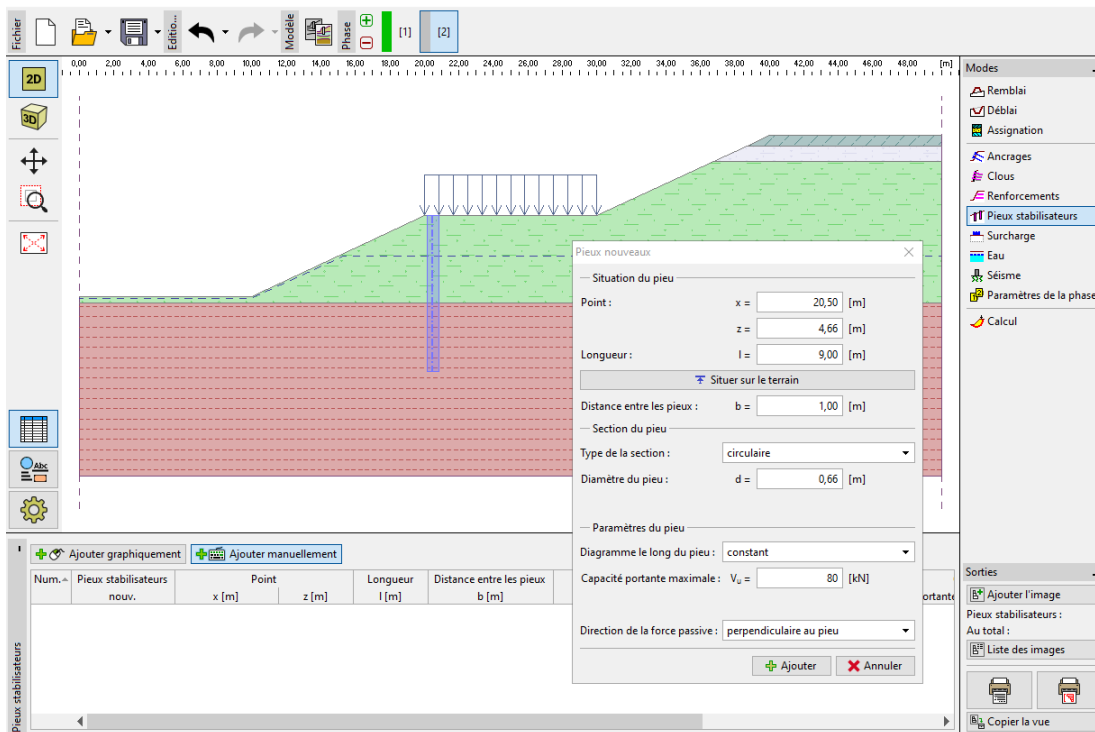


FIGURE 15 – Cadre « Pieux stabilisateurs » - Ajout d'un nouveau pieu

Remarque : outre la position, l'espacement et le diamètre de chaque pieu, il convient également de saisir leurs paramètres supplémentaires. La capacité portante maximale d'un pieu est la force qui agit contre le glissement du terrain. Nous vérifierons cette valeur lors de la prochaine évaluation en utilisant le programme « Pieux stabilisateurs ». La capacité portante peut être spécifiée comme constante ou comme augmentant linéairement de la pointe du pieu vers le haut. La force passive agit sur le pieu horizontalement ou en direction de la surface de glissement. Il est possible de trouver de plus amples informations dans l'aide (F1).

Nous allons utiliser des pieux circulaires d'un diamètre de 0,66 m et d'une longueur de 9 m. L'espacement entre les pieux est de 1 m et leur capacité portante maximale V_u est de 80 kN. Après avoir ajouté les pieux, passez au cadre « Calcul ». Sélectionnez « Standard » comme type de calcul. Dans ce type d'analyse, le programme ne recherche pas de nouvelle surface de glissement, il calcule simplement le coefficient de sécurité pour la surface de glissement insérée (dans notre cas, reprise de la phase de construction précédente). Le reste des paramètres reste inchangé.

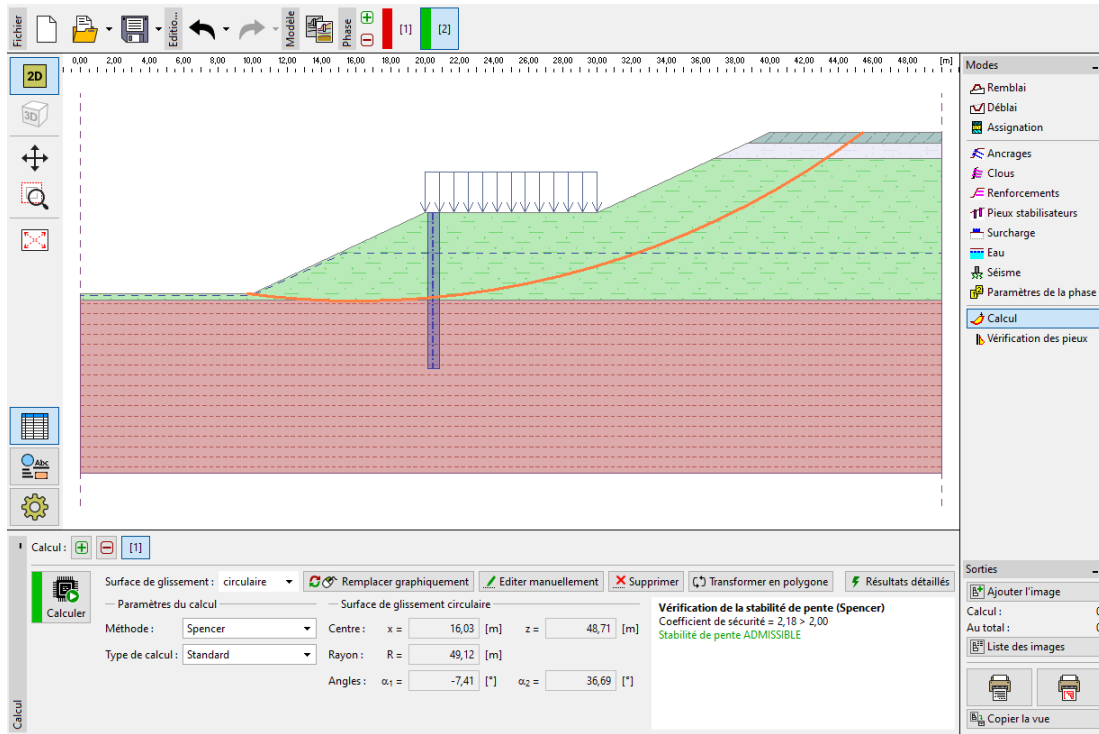


FIGURE 16 – Cadre « Calcul » - Influence des pieux stabilisateurs

Il est évident que l'utilisation des pieux stabilisateurs améliore la stabilité de la pente et cette dernière est à présent satisfaisante du point de vue du critère du coefficient de sécurité requis. Cliquez le bouton « Résultats détaillés », la fenêtre de dialogue, qui s'est ouverte, restitue les résultats de l'analyse de stabilité de la pente.

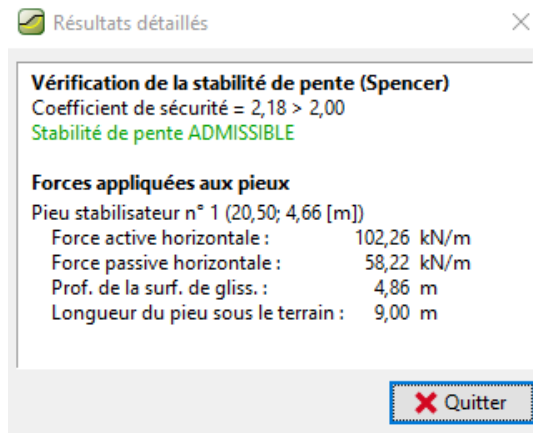


FIGURE 17 – Fenêtre de dialogue « Résultats détaillés »

Remarque : le programme restitue la profondeur de la surface de glissement à l'emplacement du pieu et la valeur des deux forces agissant sur le pieu :

- la **force active** agit sur le pieu depuis la partie supérieure de la pente, elle déstabilise la pente.

— la **force passive** agit contre le glissement de terrain et aide le pieu à stabiliser la pente (si la force passive est nulle, cela signifie que la pente devant le pieu n'est pas stable et qu'il est nécessaire de résoudre le problème de sa stabilité séparément).

La différence entre la force active et passive est en fait la force que le pieu doit transférer pour atteindre le coefficient de sécurité de la pente requis. Plus simplement, c'est la capacité portante minimale que le pieu doit offrir.

Le coefficient de sécurité dépend toujours de la position et de la forme de la surface de glissement. La surface de glissement critique, trouvée pour la pente sans pieux, a un coefficient de sécurité **SF = 1,8**. La même surface de glissement pour la pente munie des pieux stabilisateurs donne **SF = 2,20**. Mais il est également possible qu'il existe une autre surface de glissement, qui n'était pas critique avant l'installation des pieux mais qui est devenue critique après cette stabilisation. Cette surface de glissement vérifiait **SF > 1,8** avant l'installation du pieu et après stabilisation elle vérifie **SF < 2,20**.

Nous allons évaluer cette possibilité. Créez une nouvelle étape de calcul et relancer le calcul en utilisant l'optimisation de la pente avec des pieux :

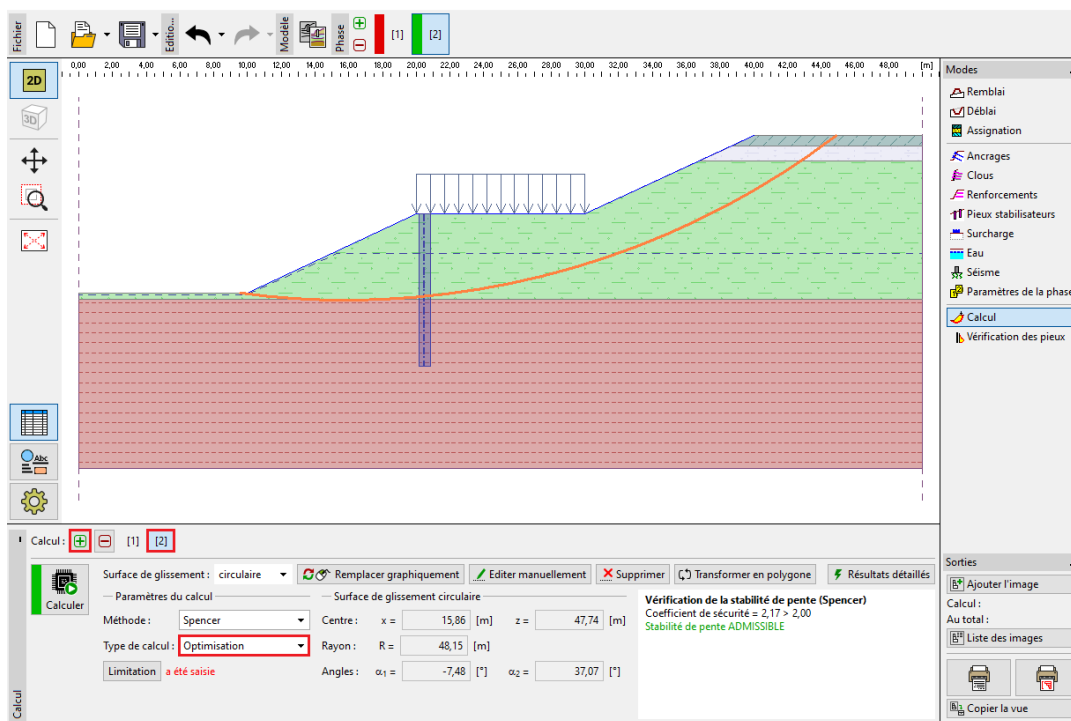


FIGURE 18 – Cadre « Calcul » - Optimisation de la surface de glissement après l'installation de pieux stabilisateurs

Nous pouvons observer que la stabilité de la pente reste admissible pour le coefficient de sécurité requis, même avec cette nouvelle surface de glissement. La différence entre l'ancienne et la nouvelle surface de glissement est minimale dans notre cas, mais ce n'est pas toujours le cas. Il est donc toujours bon de vérifier la nouvelle surface de glissement critique même après l'installation des pieux. Cet état suite à l'installation des pieux est déterminant. Pour cette raison, nous l'utiliserons pour notre prochaine étape : dimensionnement et analyse des pieux.

3.3 Analyse et dimensionnement des pieux

Choisissez le calcul n° 2 dans le cadre « Vérification des pieux », puis cliquez sur le bouton « Lancer le programme “Pieux stabilisateurs” ».

Remarque : si plusieurs rangées de pieux ont été prévues, il convient de sélectionner la rangée à évaluer.

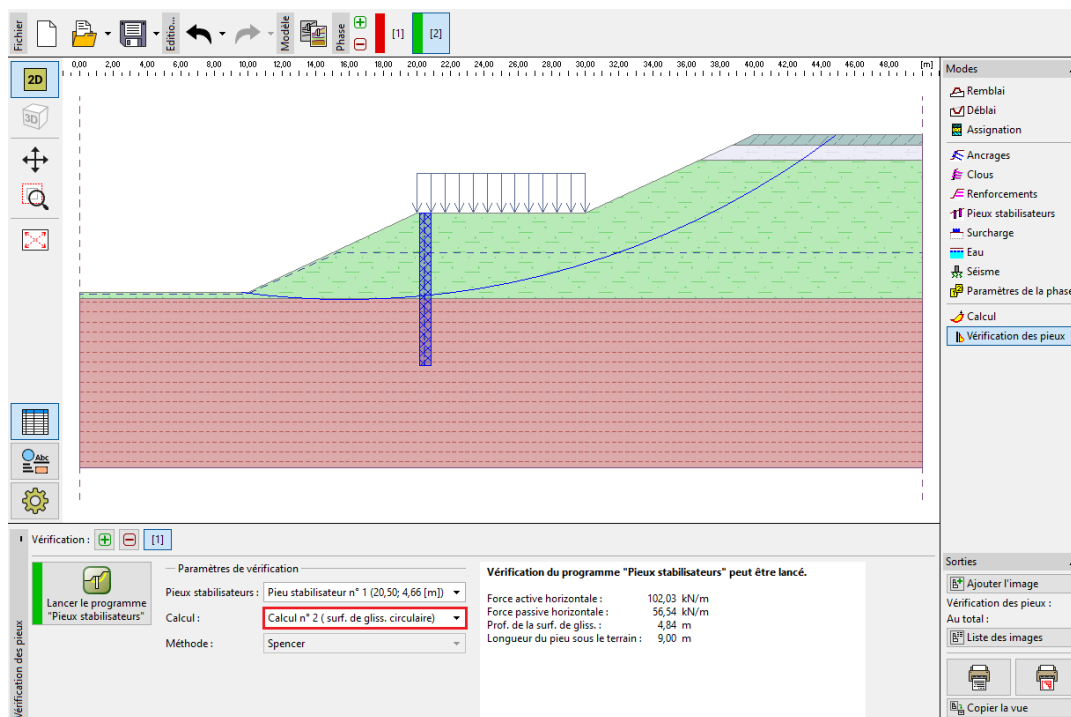


FIGURE 19 – Cadre « Vérification des pieux »

Le programme « Pieux stabilisateurs » est utilisé pour déterminer les déformations du pieu et les forces internes agissant sur lui. Ce programme est similaire au programme GEO5 « Vérification des écrans de soutènement ». La principale différence entre les deux est la façon dont une charge agissant sur un mur de pieux est déterminée. Dans le programme « Vérification des écrans de soutènement », la structure est chargée par la pression des terres sur toute la longueur du pieu. Dans le programme « Pieux stabilisateurs », la charge est divisée en deux parties. Dans la section au-dessus de la surface de glissement, le pieu est chargé en fonction de la différence entre les forces active et passive. Sous la surface de glissement, la charge est déterminée par la pression des terres.

Toutes les données du programme « Stabilité des pentes » sont automatiquement transférées vers le programme « Pieux stabilisateurs ».

Remarques :

1. la saisie de la plupart des données élémentaires dans le programme « Pieux stabilisateurs » est identique à celle dans le programme « Vérification des écrans de soutènement ». Elle est décrite en détail dans les cahiers techniques de ce programme (n° 6 et n° 7).
2. si vous souhaitez modifier certains paramètres de l'analyse dans le programme « Pieux stabilisateurs » (analyse de la méthode de la pression des terres, normes pour les matériaux, etc.), vous devez effectuer ces modifications dans le cadre « Paramètres » du programme « Stabilité des pentes ».

Le cadre « Module K_h » propose une liste de méthodes de calcul du module de réaction. Choisissez la méthode de calcul selon Schmitt. De plus amples informations au sujet du module K_h sont données dans les cahiers techniques du programme « Vérification des écrans de soutènement » ou dans l'aide du programme (F1).

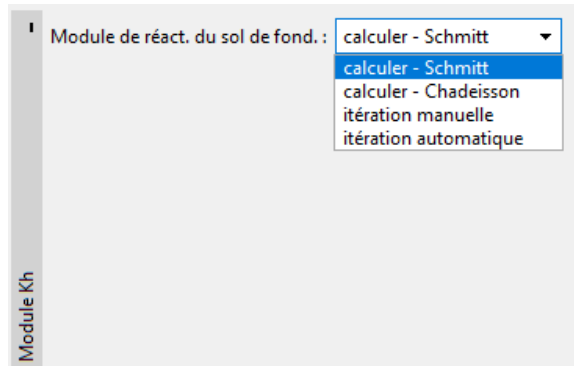


FIGURE 20 – Programme « Pieux stabilisateurs » - Cadre « Module K_h »

Dans le cadre « Sols », il faut valoriser le module de déformation E_{def} et le coefficient de Poisson ν pour chaque sol selon le tableau n° 1, ces paramètres étant nécessaires pour déterminer le module K_h . L'angle de frottement entre le sol et la structure δ vaut 15° pour chaque sol.

Définissez le type de béton et d'acier dans le cadre « Matériau ». Le programme permet de choisir les paramètres dans le catalogue de matériaux ou de les saisir manuellement. Prenez le béton C20 / 25 et l'armature longitudinale B500.

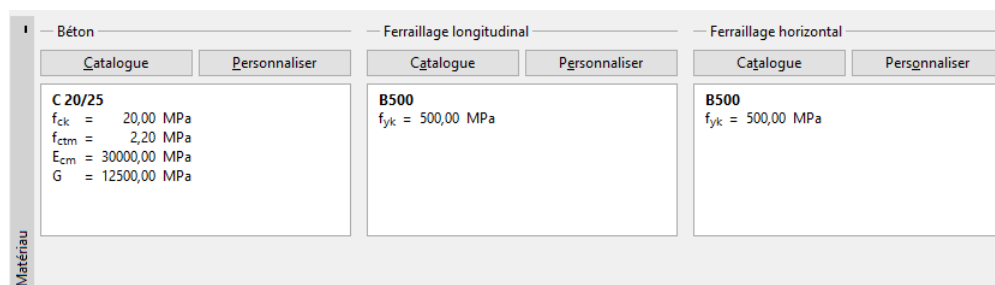


FIGURE 21 – Programme « Pieux stabilisateurs » - Cadre « Matériau »

Passez au cadre « Détermination de la pression », il reprend les forces active et passive et la profondeur de la surface de glissement obtenues lors de l'analyse de la stabilité des pentes.

Le programme propose trois façons de répartir les pressions agissant sur le pieu dans la section au-dessus de la surface de glissement. La force active peut être répartie selon trois formes élémentaires (triangulaire, rectangulaire, trapézoïdale), la force passive peut être répartie de la même manière ou selon une forme parabolique simplifiée. La répartition de la pression est expliquée en détail dans l'aide du programme (F1).

Remarque : en général, la répartition de la pression dépend du type de sol au-dessus de la surface de glissement. Dans notre cas, le sol principal est de l'argile sableuse - pour les sols à grains fins, il est recommandé d'utiliser la distribution de forme rectangulaire. Le choix de la répartition de la force passive revient au concepteur de la structure.

Détermination de la pression

Profondeur de la surface de glissement : $h_{s1} =$ [m]

Saisie de la force horizontale active :

Saisie de la force horizontale passive :

Force horizontale active : T = [kN/m]

Force horizontale passive : P = [kN/m]

Distribution des forces actives :

Distribution des forces passives :

FIGURE 22 – Programme « Pieux stabilisateurs » - Cadre « Détermination de la pression »

Remarques :

1. il est également possible de déterminer manuellement la pression agissant au-dessus de la surface de glissement, cette possibilité est à utiliser lorsque l'utilisateur ne veut pas calculer la charge sur le pieu en fonction de la différence entre la force active et passive.
2. pour un pieu encastré dans une couche de roche, il convient de passer par le cadre « Roche » et d'y saisir la longueur d'encastrement du pieu dans la roche ainsi que la capacité portante de la roche. Dans ce cas, la contrainte maximale ne serait alors pas considérée comme la pression des terres passive ; au lieu de cela, elle pourrait atteindre n'importe quelle valeur, et c'est cette valeur qui serait alors comparée à la capacité portante de la roche dans le cadre « Calcul ». Nous n'utilisons pas ce cadre dans notre exemple.

A présent, passez au cadre « Calcul ».

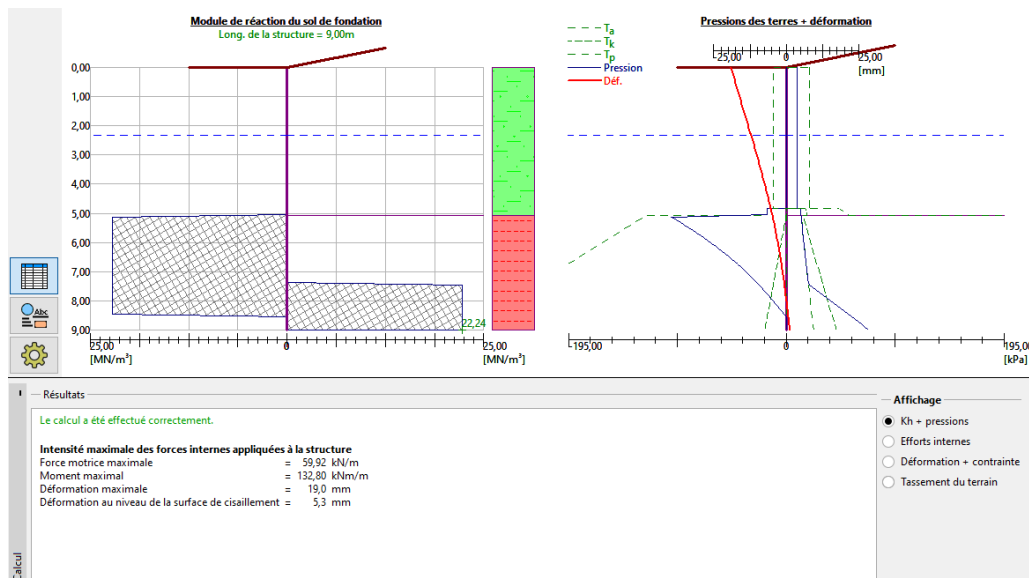


FIGURE 23 – Programme « Pieux stabilisateurs » - Cadre « Calcul » - K_h + pressions

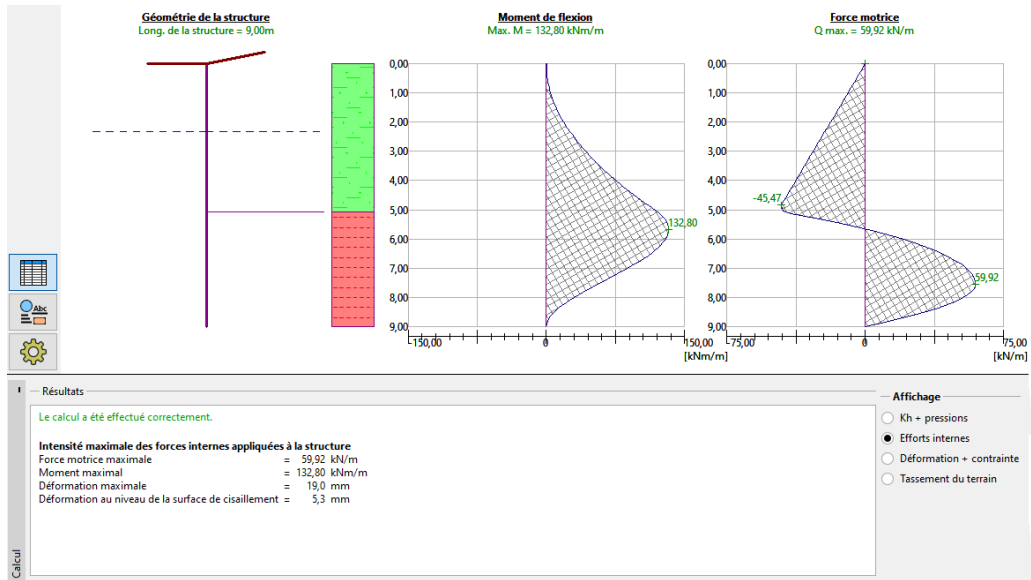


FIGURE 24 – Programme « Pieux stabilisateurs » - Cadre « Calcul » - Efforts internes

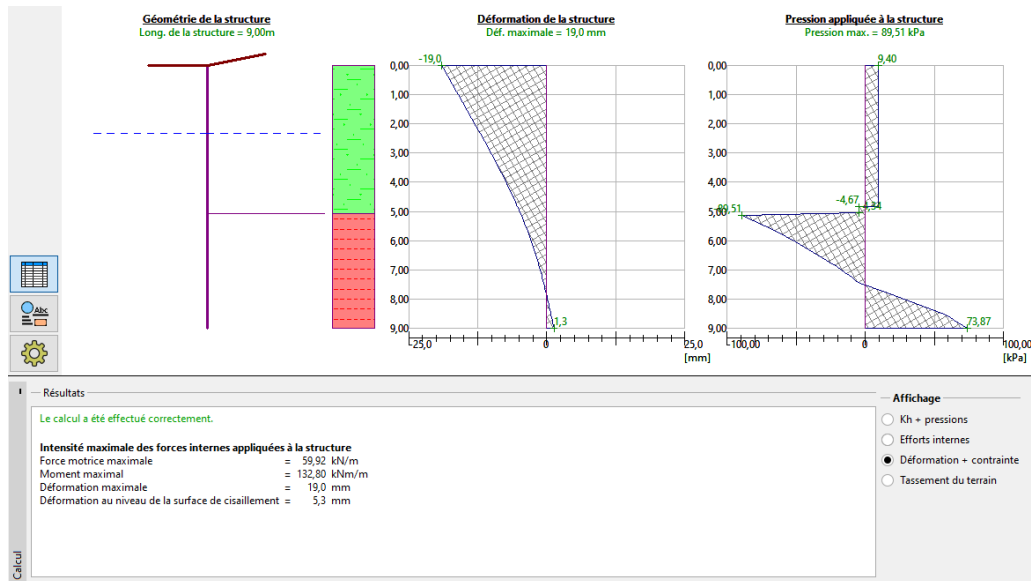


FIGURE 25 – Programme « Pieux stabilisateurs » - Cadre « Calcul » - Déformation + contrainte

Passez au cadre « Dimensionnement » afin de concevoir l'armature des pieux.

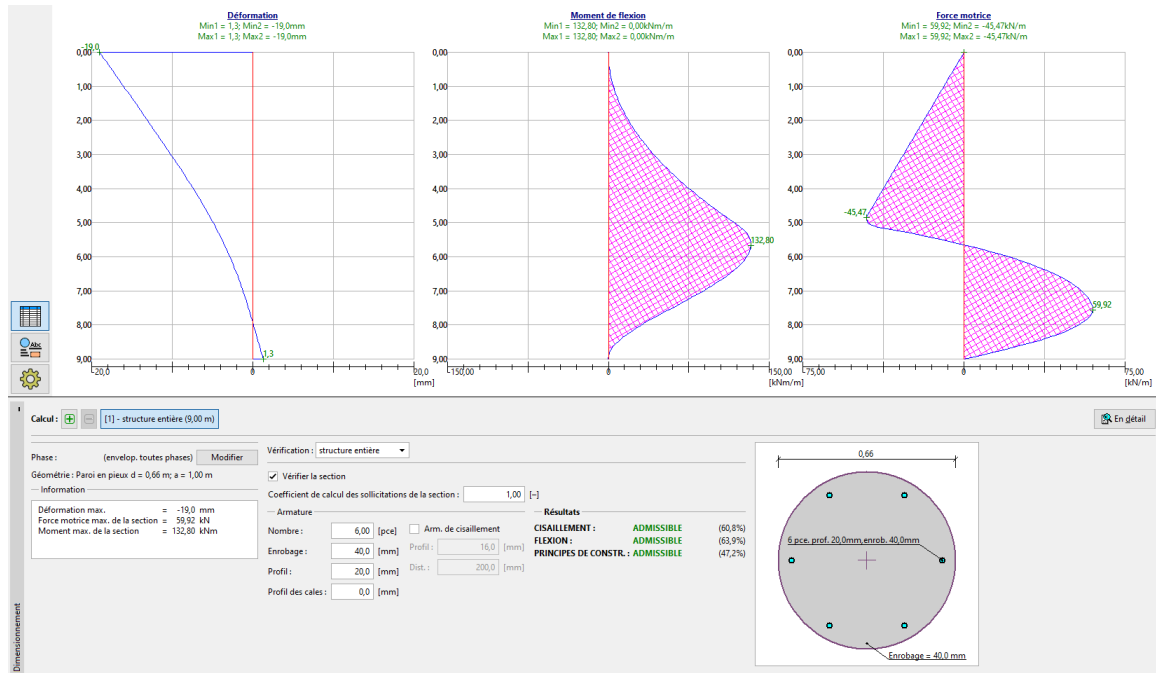


FIGURE 26 – Programme « Pieux stabilisateurs » - Cadre « Dimensionnement »

La conception de notre pieu est satisfaisante vis à vis de toutes les vérifications. Pour connaître la capacité portante maximale du pieu en cisaillement, il suffit d'ouvrir la fenêtre de dialogue « En détail » en cliquant sur le bouton éponyme.

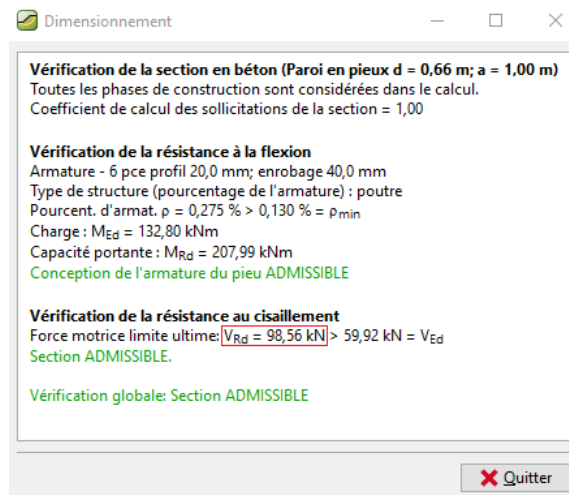


FIGURE 27 – Programme « Pieux stabilisateurs » - Cadre « Dimensionnement » - « En détail »

Dans le programme « Stabilité des pentes », nous avons fixé la capacité portante maximale des pieux V_u à 80 kN. Les résultats fournis par le programme « Pieux stabilisateurs » montre que la capacité portante réelle est plus grande (98,56 kN). Pour connaître le coefficient de sécurité réel de la pente, nous devons revenir au programme « Stabilité des pentes » (en cliquant sur le bouton « Quitter et transmettre les données ») et modifier la valeur de V_u (actuellement de 80 kN) par 98,56 kN.

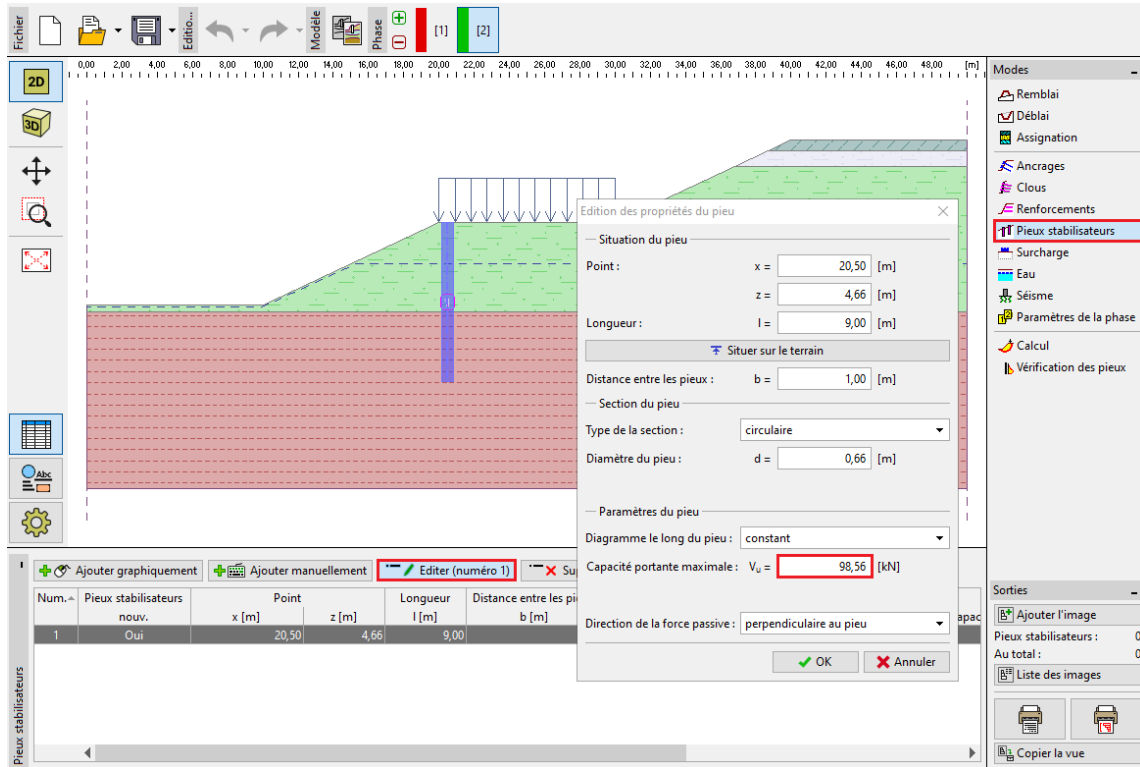


FIGURE 28 – Programme « Stabilité des pentes » - Édition des paramètres du pieu

Suite à cette modification, relancez le calcul de la surface de glissement.

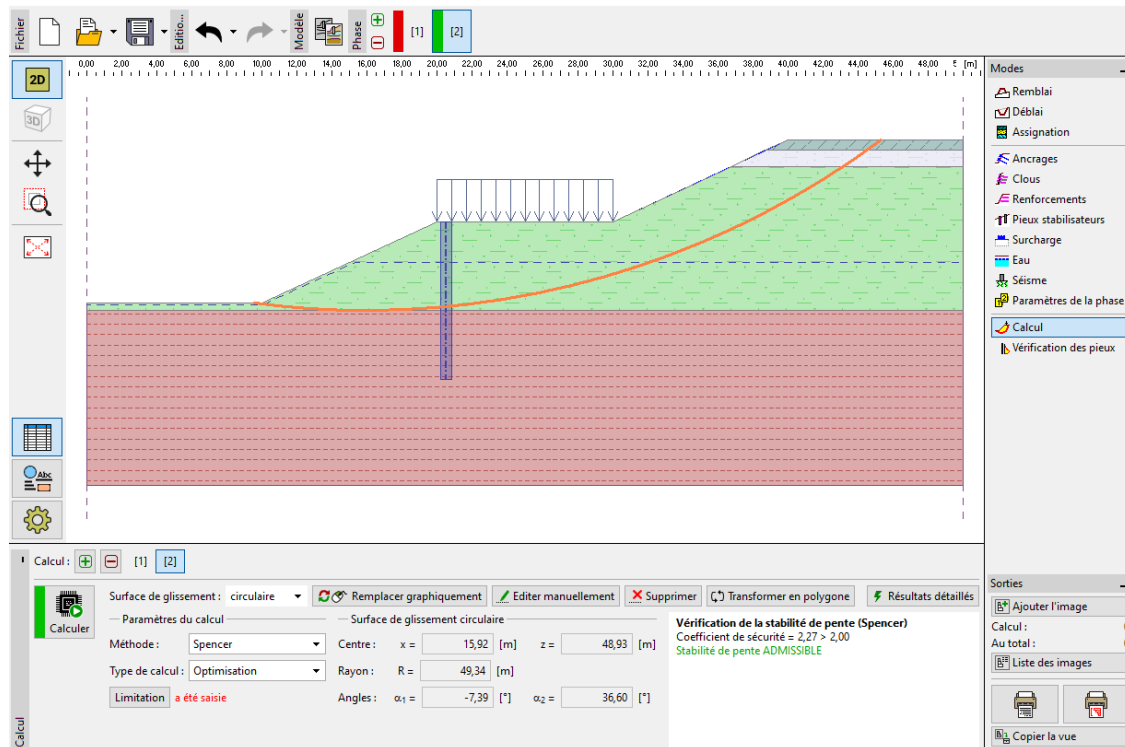


FIGURE 29 – Le programme « Stabilité des pentes » - Calcul utilisant la capacité portante réelle des pieux

Remarque : la forme et la position de la surface de glissement critique peuvent varier suite à la modification de la capacité portante des pieux, tout comme l'intensité des forces agissant sur les pieux. Dans notre exemple, les variations sont minimales et les forces sont restées quasi identiques. Si ces variations avaient été plus importantes, il aurait fallu lancer une nouvelle analyse du programme « Pieux stabilisateurs ».

4 Conclusion

Le coefficient de sécurité de la pente requis était **SF = 2,0**. Nous avons amélioré le coefficient de stabilité de la pente en utilisant des pieux stabilisateurs de **SF = 1,8** à **SF = 2,27**. La conception des pieux est satisfaisante (en termes de cisaillement et de flexion) et le déplacement maximal des pieux est de 19,1 mm. Cette valeur de déplacement est admissible.