

GEO5

Stabilité des roches : Stabilité des coins de roche

Résumé

Le but de ce cahier technique est d'évaluer la stabilité d'un talus rocheux situé dans une roche semi-dure à dure affectée par la tectonique dans une excavation donnée. L'affleurement de l'excavation à étudier est formé d'un système de failles et de joints tectoniques disposés en coins rocheux tridimensionnels pour la plupart instables.

Le fichier exemple correspondant est « Demo_manual_28.gsk ».

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

L'histoire de l'affleurement provient des travaux d'excavation liés à la construction du tunnel ferroviaire à deux voies de Votice creusé dans la roche magmatique du Paléozoïque. Les roches sont dominées par des granites filoniens à petits grains et des aplites, parfois du granite à amphibole-biotite. L'endroit à évaluer est caractérisé par une orientation défavorable des discontinuités, qui affecte négativement la stabilité de la paroi rocheuse et crée des coins rocheux (*cf.* Fig. 1).



FIGURE 1 – Versant ouest de la fosse d'excavation, photographie L. Mařík

L'étude géologique a révélé que la stabilité de l'excavation est affectée par trois à quatre systèmes de failles et de joints. La masse rocheuse est fragmentée en un large éventail de pierres et de blocs rocheux et de larges blocs rocheux d'une taille pouvant atteindre plusieurs mètres. La direction du pendage des failles rocheuses forme un angle aigu inférieur à 45° avec la pente de l'excavation et la pente s'incline avec un angle de 65° à 80° vers l'est (*cf.* Fig. 2).

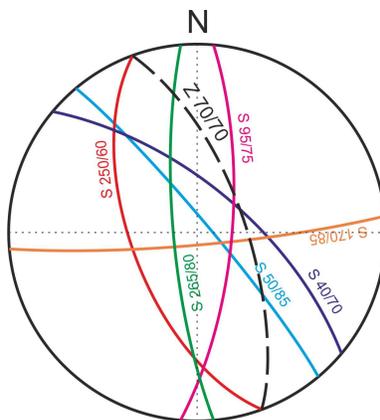


FIGURE 2 – Diagramme de projection orthogonale de Lambert avec les discontinuités les plus courantes Z 70/70 (direction de pendage / pendage) est l'orientation de la paroi de l'excavation.

Cette orientation défavorable (et imprévue avant creusement de la tranchée) des surfaces de discontinuité provoque des coins rocheux larges et plats instables lors du creusement, qui ont une prédisposition importante à s'enfoncer dans la fosse de construction (*cf.* Fig. 3).

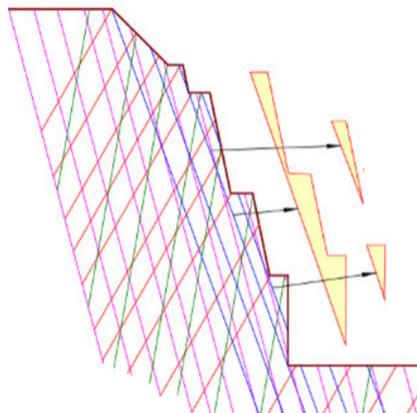


FIGURE 3 – Projection des principales surfaces de discontinuité dans la fosse de construction.

Pour cette nouvelle situation, il est nécessaire de concevoir la méthode de sécurisation de la fosse de construction - de déterminer la sécurité des coins de roche. Ce cahier technique va décrire la solution pour le coin rocheux dans la section sélectionnée.

Remarque : un massif rocheux à l'état naturel contient presque toujours au moins deux systèmes majeurs de surfaces de discontinuité qui prédéterminent la nature de la rupture du versant rocheux. Lorsqu'une masse rocheuse a été fracturée par un système présentant un faible nombre de discontinuités, ce système est la clé de voûte pour une évaluation globale de la stabilité d'un mécanisme de rupture et d'une situation d'instabilité.

2 Projet

Le processus de conception de la stabilisation de coins rocheux tridimensionnels instables sera décrit plus loin sur l'exemple d'une section d'une excavation d'un portail de tunnel. La stabilisation est conçue pour une durabilité de 100 ans et le coefficient de sécurité requis vaut 1,5.

Sur la base du levé géologique, les échantillons de granite et d'aplite classés comme roches dures de types R2 et R3 (ČSN 73 6133), ont les propriétés mécaniques suivantes : $\sigma_c = 15 - 60$ MPa, poids volumique $\gamma = 27 \text{ kN/m}^3$, angle de frottement effectif $\varphi' = 32 - 42^\circ$, cohésion effective $c' = 100 - 150$ kPa, coefficient de Poisson $\nu = 0,20$, module de déformation 100–200 MPa. Ainsi ces paramètres mécaniques montrent des caractéristiques de déformation élevées de la masse rocheuse mesurées sur des échantillons de roche de petite taille, la résistance globale de la masse est plus faible en raison de la fracturation élevée par les ruptures de cisaillement (effet d'échelle). La résistance au cisaillement sur les plans peut tendre vers zéro.

Les conditions hydrogéologiques sont très simples, aucune fissure gorgée d'eau n'a été observée sur la paroi rocheuse, les sources d'eau occasionnelles sont uniquement liées à l'augmentation des précipitations ou au dégel de printemps. Il n'y a pas de nappe phréatique liée à la paroi rocheuse. Le géologue du projet a effectué des mesures d'orientation de la pente et de l'orientation des surfaces de discontinuité des masses rocheuses sur les zones exposées de la fosse de construction. Dans la section transversale considérée, il a été déterminé que : la pente de la fosse de construction a une orientation de 257/78 (direction de pendage/pendage) ; l'orientation de la pente d'excavation évaluée est Z 180/15 (direction de pendage/pendage) et les orientations typiques des ruptures étudiées sont 20/80 et 225/70. Les paramètres suivants ont été trouvés sur les deux surfaces de cisaillement : angle de frottement interne effectif $\varphi' = 15^\circ$, cohésion effective $c' = 5$ kPa.

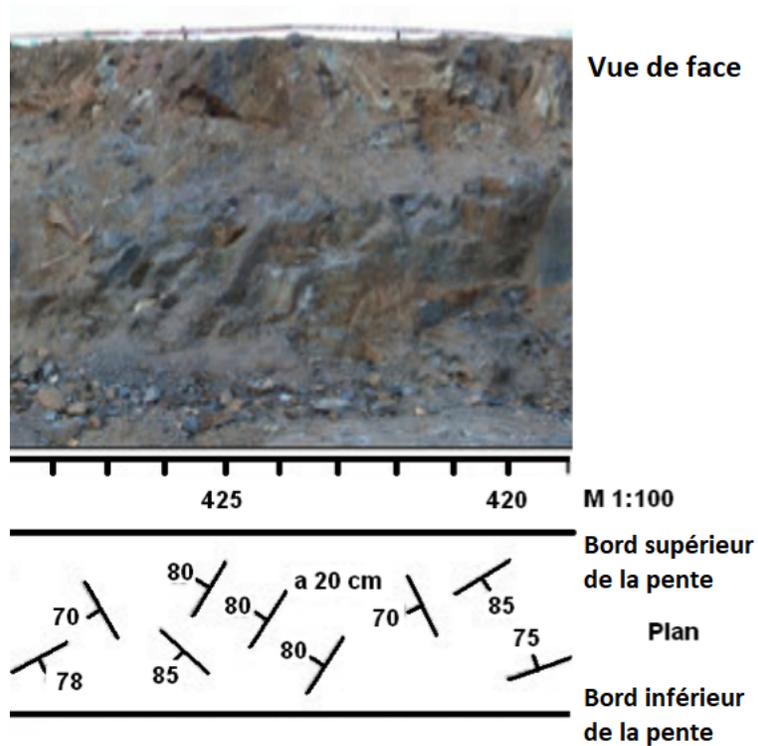


FIGURE 4 – Vue de la paroi rocheuse - documentation photo (L. Mařík)

3 Solution

L'évaluation de la stabilité de la pente du coin de roche coulissant dans la section considérée et sa stabilisation doivent être ajustées selon des facteurs de sécurité (la raison principale est une comparaison avec les calculs manuels). Chaque étape de calcul de la conception est décrite dans le texte ci-après.

3.1 Paramétrage de l'étude

3.1.1 Paramétrage du calcul associé au coefficient de sécurité et à la rupture de talus rocheux

Dans le cadre « Paramètres », cliquez sur le bouton « Sélectionner les paramètres », sélectionnez « Standard – Coefficients de sécurité » et confirmez via « OK ».

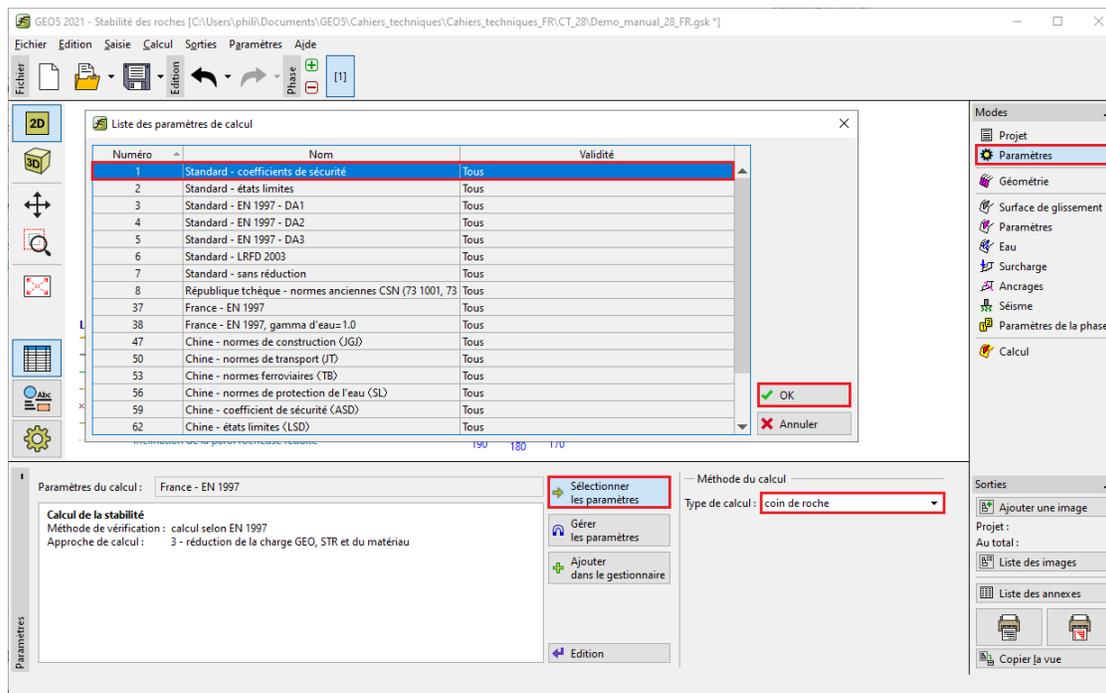


FIGURE 5 – Cadre « Paramètres » - Liste des paramètres de calcul

Nous allons aussi choisir le type de calcul « coin de roche ».

Remarque : l'application « Stabilité des roches » peut évaluer une paroi rocheuse fracturée par une rupture de cisaillement (éboulements rocheux) à l'aide d'un plan de cisaillement plan et/ou polygonal et d'un coin de roche.

3.1.2 Définition de la géométrie du terrain et de la paroi rocheuse

La géométrie 3D de la pente rocheuse à évaluer (terrain) et de la fosse d'excavation (paroi rocheuse) doit être configurée dans un cadre « Géométrie ». La saisie de l'orientation de la pente ou de la surface du terrain se fait par le biais du sens du pendage et du pendage (*remarque : sens de l'inclinaison et inclinaison dans le programme*), ces données ont été mesurées pendant le levé géologique structurel - les données entrées sont présentées dans le tableau ci-dessous. La hauteur de la paroi rocheuse est de 13m. Les plans saisis sont représentés en projection orthogonale de Lambert et un arc représente une projection (une coupe transversale) d'un plan de cisaillement avec hémisphère inférieur de Lambert.

Remarque : si aucune étude géologique structurale n'a été réalisée, l'orientation de la paroi rocheuse pourrait être donnée par un levé géodésique par les trois points pour chaque plan (par exemple 2 points au bas de pente, un en haut de pente). Une autre possibilité est l'utilisation d'un mètre ruban ou d'une photogrammétrie. Dans une condition difficile, il existe une option pour évaluer la hauteur de la pente en considérant le rapport entre la taille d'un homme et celle de la face de la pente.

3.1.3 Paramétrage des orientations (terrain et paroi rocheuse)

	Sens du pendage [°]	Pendage [°]
Paroi rocheuse	257	76
Terrain (courbe supérieure de la paroi)	180	15

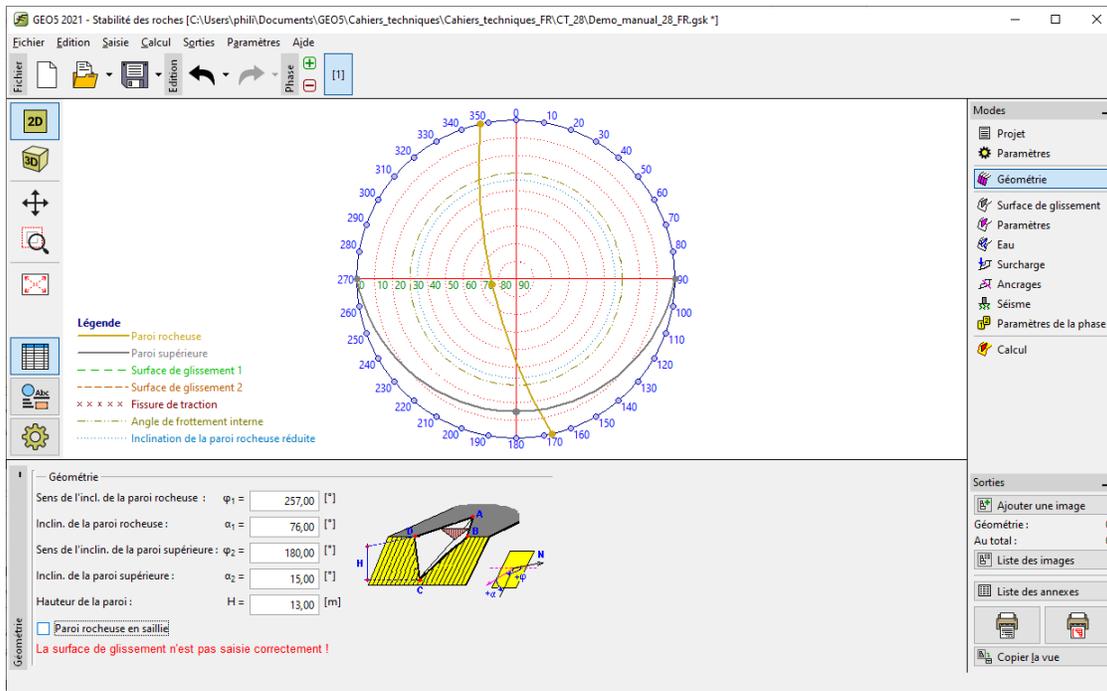


FIGURE 6 – Cadre « Géométrie »

3.1.4 Paramétrage des orientations (rupture par cisaillement)

L'orientation (géométrie) de la rupture par cisaillement doit être définie dans la fenêtre « Surface de glissement ». Sa saisie se fait par l'intermédiaire du sens du pendage et du pendage (*remarque : sens de l'inclinaison et inclinaison dans le programme*) et est étudiée par un levé géologique structural - les données à saisir se trouve dans le tableau ci-après. La fenêtre graphique de saisie affiche également les données d'orientation en projection orthogonale de Lambert. Un arc indique l'intersection d'un plan avec l'hémisphère inférieur de Lambert.

	Sens du pendage [°]	Pendage [°]
Surface de glissement 1	30	80
Surface de glissement 2	225	70

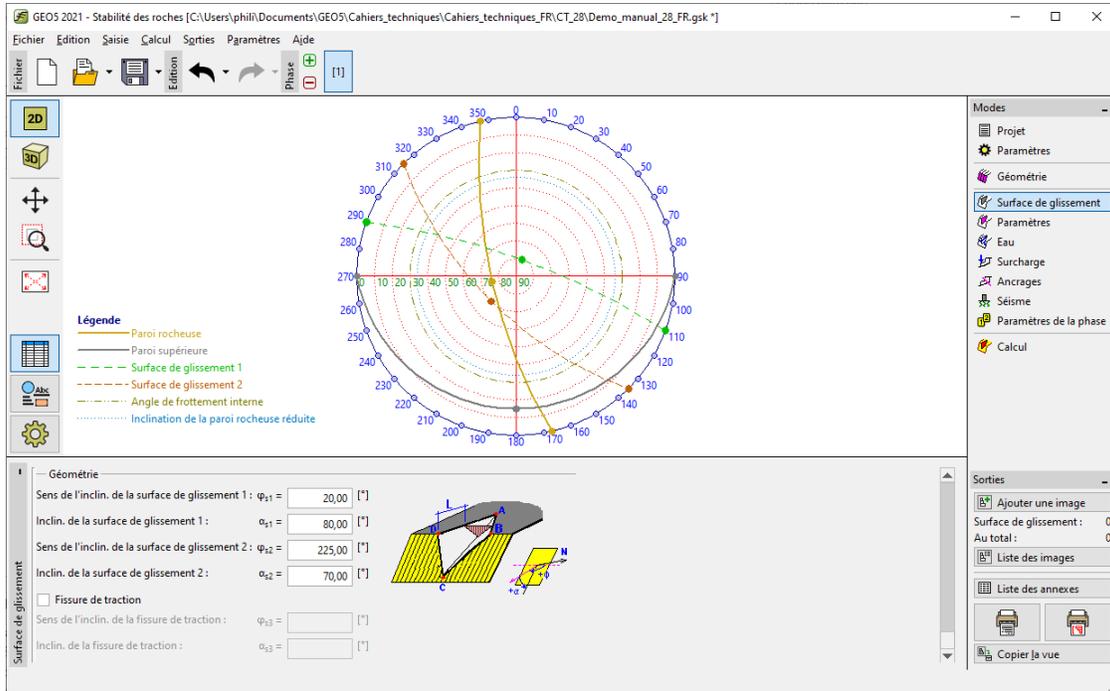


FIGURE 7 – Cadre « Surface de glissement »

Il est également possible de voir le coin de roche défini en utilisant la « Vue 3D » :

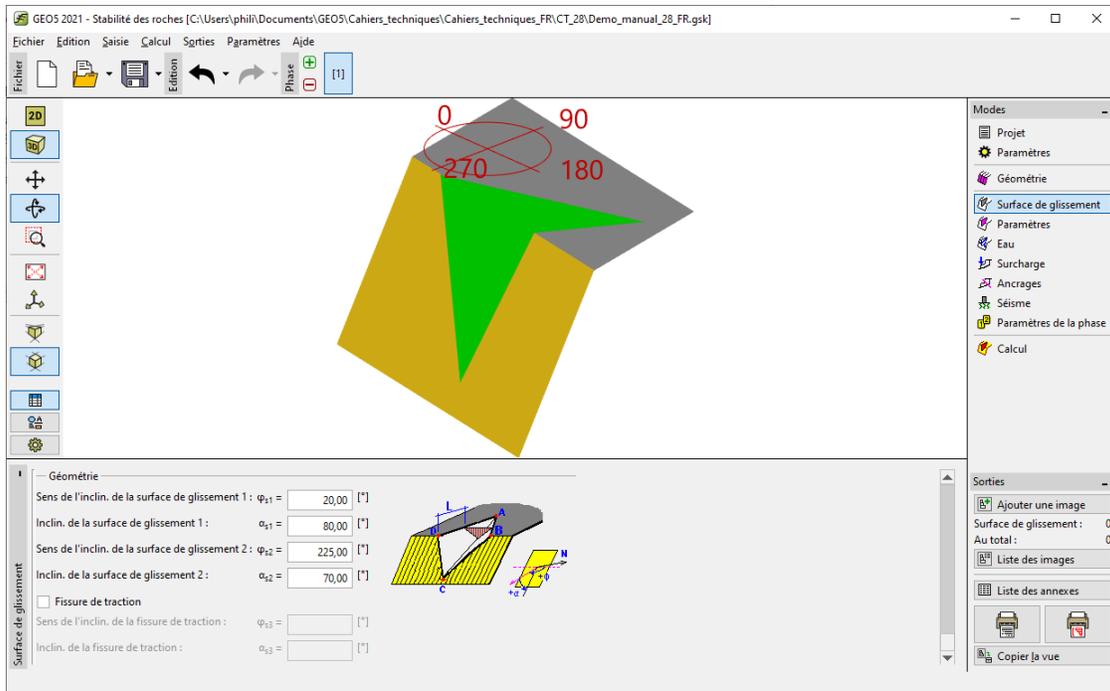


FIGURE 8 – Représentation 3D du coin de roche

Remarque : l'orientation des plans de cisaillement 3D est liée aux coordonnées géographiques. Ces coordonnées sont liées à l'orientation du Nord dans le sens horizontal et au centre de gravité dans le

sens vertical. L'orientation a été mesurée à l'aide d'une boussole géologique. Les principales ruptures pourraient être décrites par des mesures géophysiques.

3.1.5 Saisie des propriétés des roches et des plans de cisaillement

Les propriétés mécaniques du massif rocheux sont décrites dans le cadre « Paramètres ». Ici, le poids volumique du matériau formant le massif et la forme du plan de cisaillement de la roche sont réglés sur le modèle de Mohr-Coulomb. Le poids volumique d'un granite est $\gamma = 27 \text{ kN/m}^3$ et les propriétés de cisaillement obtenues par des essais de cisaillement sur les deux plans de cisaillement discutés précédemment sont $\varphi' = 15^\circ$ et $c' = 5 \text{ kPa}$:

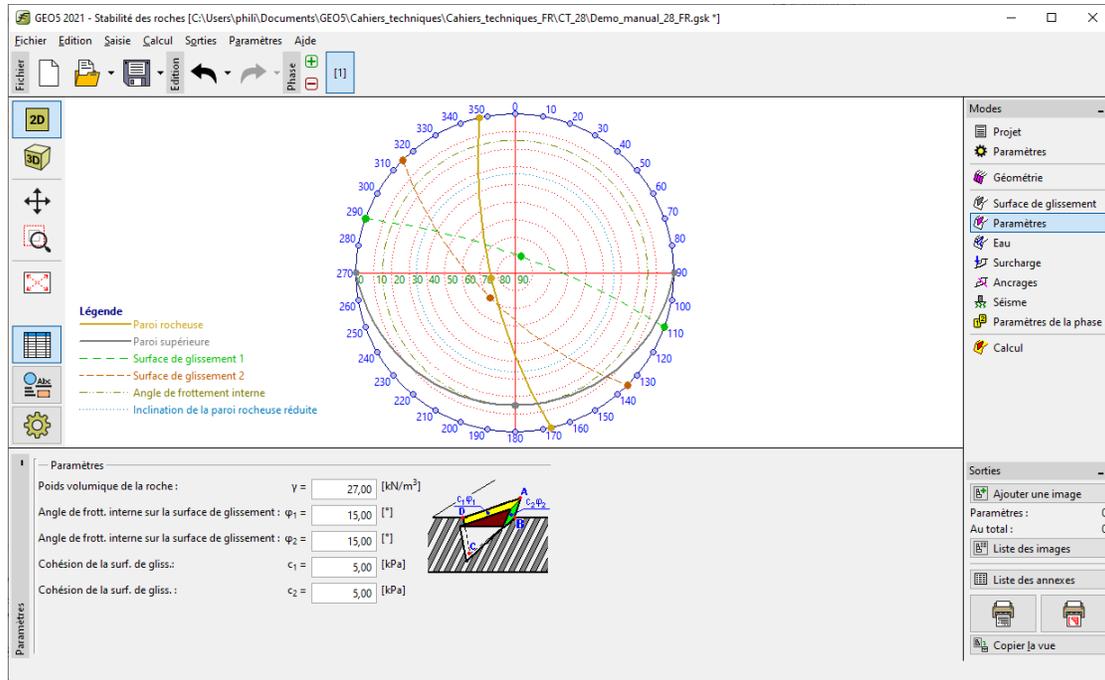


FIGURE 9 – Cadre « Paramètres »

Remarques : la détermination la plus simple de la résistance au cisaillement le long des surfaces de discontinuité consiste à déplacer successivement deux blocs rocheux retirés de la masse rocheuse (initialement séparés par la surface de discontinuité étudiée). Cette mesure ne convient qu'aux surfaces de discontinuité sans saillies ni dépressions (éléments de dilatation). Si ce n'est pas le cas, les paramètres doivent être obtenus par recalcul à partir d'un essai ou d'un essai in situ complexe avec des instruments.

3.1.6 Eau souterraine

La nappe phréatique est mise en place dans le cadre « Eau ». Sur la base de l'étude hydrogéologique, il n'y a pas d'impact sur les eaux souterraines.

3.2 Paramétrage de la phase de conception

Le cadre « Paramètres de la phase » va nous permettre de choisir la situation de calcul. Ici, pour une durabilité de 100 ans de la stabilité de la paroi rocheuse de la section du portail du tunnel, il convient donc de sélectionner la situation « permanente ».

3.3 Calcul

Le processus de calcul s'exécute dès que nous cliquons sur le bouton « Calcul ». Les résultats élémentaires ainsi que diverses options apparaissent dans le cadre « Calcul ». Pour accéder aux résultats détaillés, il convient soit de cliquer sur le bouton « En détail », soit de consulter la note de calcul. Dans notre cas, un coefficient de sécurité de 1,32 a été obtenu. La stabilité du coin rocheux n'est pas en accord avec les exigences de sécurité ($SF \geq 1,5$). Pour une échelle de temps assez longue, une possibilité d'instabilités locales de surface pourrait affecter la masse rocheuse. De là, une solution technique augmentant la stabilité du coin doit être conçue.

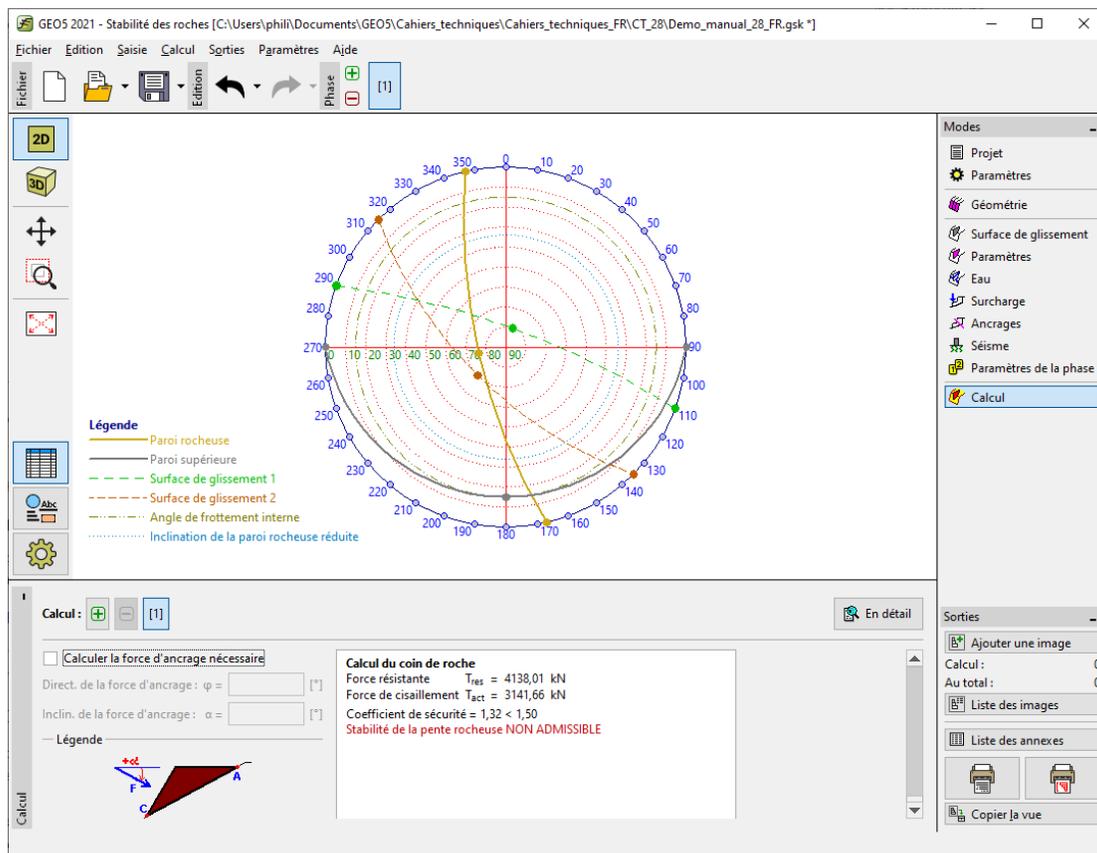


FIGURE 10 – Cadre « Calcul » - Phase de conception 1

3.4 Conception de la solution augmentant la stabilité

L'augmentation de la stabilité du coin de roche est possible par modification de la forme de la pente (vers une pente plus faible) ou une excavation par petits bancs (qui diminue la pente globale). Cette solution nécessite un important nombre de travaux de terrassement et une surface occupée plus importante, ce qui la rend coûteuse. Une deuxième option consiste à conserver la forme actuelle de la pente rocheuse et à fixer la stabilité du coin roche couissant au moyen de boulons (ancrages) ou de clous. C'est cette deuxième option qui est décrite dans le texte suivant. Afin de concevoir les ancrages, nous allons ajouter une seconde phase de construction en cliquant sur le bouton « + » situé dans le menu « Phase » :



FIGURE 11 – Menu « Phase » - Ajout de la phase suivante

Dans le cadre « Calcul », nous allons cocher l'option « Calculer la force d'ancrage nécessaire » et définir la direction et l'inclinaison de la force d'ancrage : l'orientation par rapport à la direction de pendage vaut 270° , et l'inclinaison de 10° . Une fois la saisie terminée, le calcul est automatiquement soumis et l'application affiche un résultat. Pour la force d'ancrage calculée de 428 kN, la valeur du coefficient de sécurité est de 1,5 :

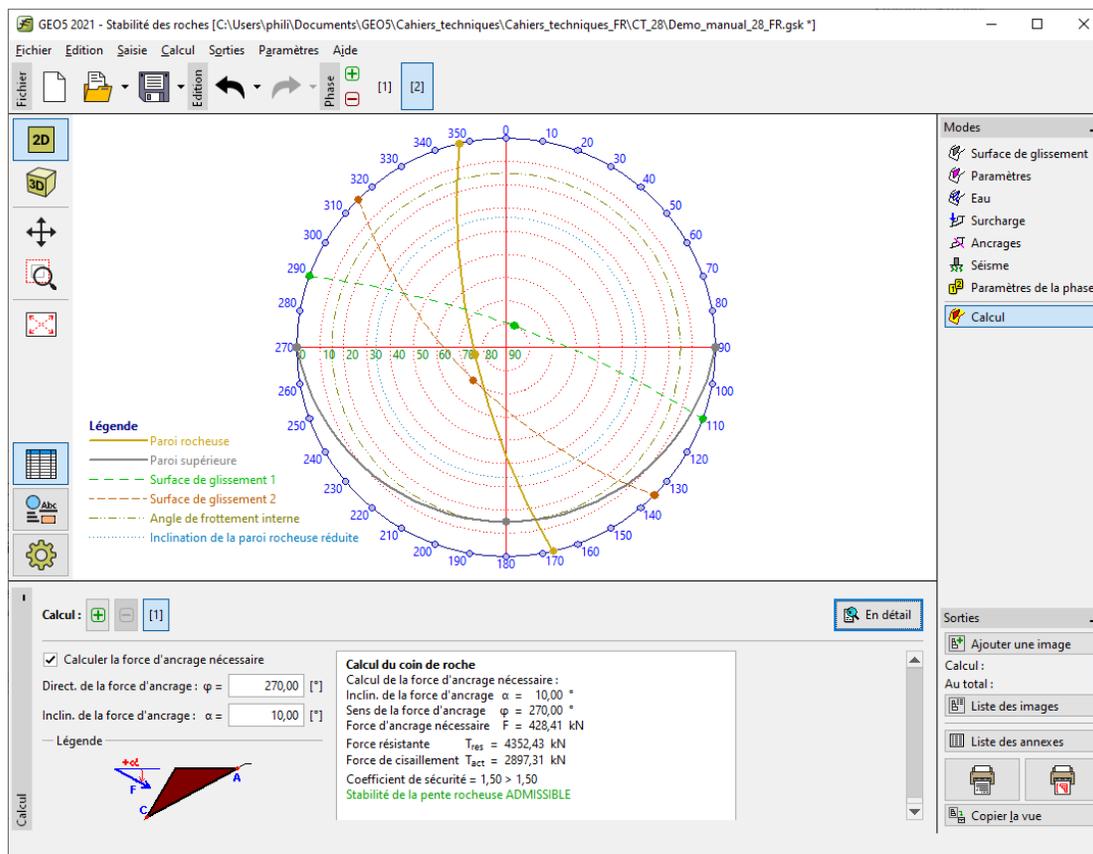


FIGURE 12 – Cadre « Calcul » - Résultat de calcul détaillé

La géométrie de la pente permet une direction et un pendage monotones pour tous les ancrages. L'étape suivante consiste donc à évaluer une technologie d'ancrages de roche appropriée avec une capacité portante et un calcul du nombre requis d'ancrages placés (densité de placement). Dans notre situation, nous préférons les boulons d'ancrage standard non précontraints (les boulons sélectionnés sont injectés lors des travaux de forage). Les boulons sélectionnés produisent une force de 50 kN immédiatement après l'installation et une capacité portante minimale de 150 kN 24 heures plus tard. D'après ce qui précède, il s'ensuit que 5 ancrages sont nécessaires pour fixer le coin de roche ; une grille orthogonale de $2,5 \times 2,5$ m est proposée. En raison de la fragmentation de la roche, il est conseillé de compléter les ancrages par un filet en acier.

Remarque : si le massif rocheux présente un litage important ou des plans parallèles affectés tectoniquement, l'ancrage doit être foré près d'une direction perpendiculaire aux plans (l'angle minimal entre le plan de la roche et le boulon doit être de 45°).

4 Conclusion

Pour notre étude, un coefficient de sécurité $SF = 1,32 (< 1,5)$ a été obtenu pour le coin de roche non sécurisé. Parmi les deux options, celle de l'ancrage du coin rocheux a été retenue sur la base de considérations économiques. Dans la deuxième phase de construction, nous avons déterminé la force d'ancrage nécessaire, sa direction et sa pente. Pour permettre une direction et une inclinaison uniformes des ancrages sur toute la pente rocheuse, un type d'ancrage adapté aux conditions géologiques données a été sélectionné et une estimation de la grille de placement des ancrages a été réalisée.