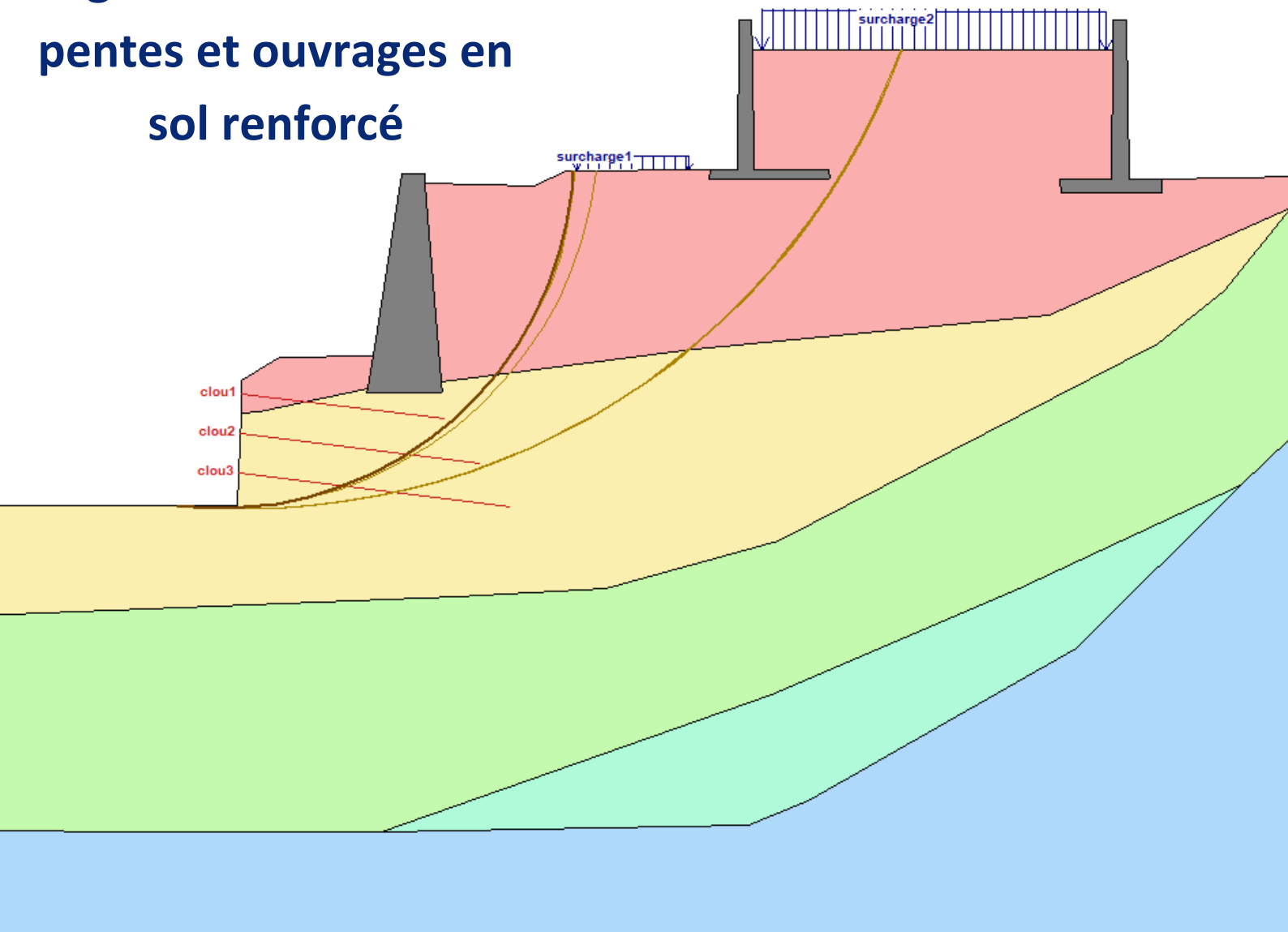


GeoStab 5

V5.3.4

Logiciel de stabilité de
pentes et ouvrages en
sol renforcé



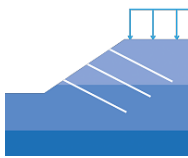
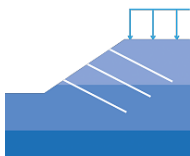
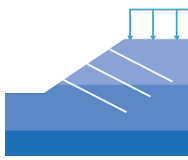


Table des matières

Copyright	10
Avertissements	10
Introduction	11
1. Installation	13
1.1. Configuration minimale	13
1.2. Installation du logiciel	13
2. Interface.....	14
2.1. Description générale de l'interface	14
2.2. Barre des menus	15
2.2.1. Ouverture, sauvegarde de fichiers, annuler et rétablir	16
2.2.2. Onglet « Préparation des données », « Affichage » et « Outils ».....	16
2.2.3. Fenêtre de gestion des phases et des cas	22
2.2.4. Fenêtre de propriétés	24
2.2.5. Liste récapitulative des données	25
2.2.6. Fenêtre graphique	27
3. Saisie du modèle.....	27
3.1. Comportements génériques de saisie	27
3.1.1. Boutons de mode de saisie	28
3.1.2. Boutons de validations	28
3.1.3. Boutons de navigation.....	28
3.1.4. Boutons d'activation et de suppression	29
3.2. Cartouche	29
3.3. Caractéristiques du dessin	30
3.4. Saisie du Profil	31
3.5. Saisie des sols.....	33
3.5.2. Association de sols à des segments du profil	38
3.5.3. Visualisation des sols.....	39
3.6. Condition d'eau.....	39
3.6.1. Type de saisie des conditions d'eau	39
3.6.2. Association d'une nappe à un sol	41
3.6.3. Gestion des points d'une nappe.....	42



3.7.	Ajouter une charge.....	42
3.8.	Ajouter une inclusion	44
3.8.1.	Ajouter un clou.....	45
3.8.2.	Ajouter une épingle	49
3.8.3.	Ajouter un tirant	50
3.8.4.	Ajouter un massif géosynthétique	54
3.8.5.	Ajouter un massif en sol renforcé	55
3.8.6.	Ajouter un massif grille tressé.....	56
3.8.7.	Ajouter un massif treillis.....	56
3.9.	Paramètres sismiques	56
3.10.	Coefficients de sécurité partiels.....	58
3.11.	Ajouter une surface de rupture	62
3.11.1.	Génération par intervalles d'entrée/sortie.....	63
3.11.2.	Génération par les centres.....	65
3.11.3.	Vérification d'une surface.....	67
3.11.4.	Génération par intervalles d'entrée/sortie (spirales logarithmiques).....	67
3.11.5.	Plans et coins de poussée-butée ou Plans et cercles	68
3.11.6.	Surfaces définies par des points.....	70
3.11.7.	Surfaces aléatoires	71
3.12.	Ajouter une étiquette.....	71
3.13.	Ajouter un sondage	72
4.	Calcul et résultats	73
4.1.	Lancement du calcul.....	73
4.2.	Conditions d'exécution du calcul	74
4.3.	Interface de sortie de calcul.....	75
4.4.	Feuille de sortie de calcul	78
5.	Considérations théoriques	80
5.1.	Généralités	80
5.2.	Méthode des tranches.....	83
5.3.	Méthode de Fellenius.....	86
5.4.	Méthode de Bishop	87
5.4.1.	Méthode de Bishop modifiée.....	87



5.4.2.	Méthode de Bishop rigoureuse.....	88
5.4.3.	Méthode de Bishop modifiée étendue : Méthode de Carter.....	91
5.5.	Méthode des perturbations	94
5.5.1.	Principe.....	94
5.5.2.	Mise en équations	95
5.5.3.	Choix du σ_0 et v	96
5.6.	Modélisation.....	96
5.6.1.	Coefficients de sécurité partiels	96
5.6.2.	Paramètres de sol.....	98
5.6.3.	Prise en compte de l'eau	98
5.6.4.	Prise en compte des inclusions	100
5.6.5.	Surfaces de rupture	107
5.6.6.	Prise en compte des sollicitations sismiques	110
5.7.	Calculs sur les clous.....	112
5.8.	Vérification de Kranz.....	114
5.8.1.	Généralités.....	114
5.8.2.	Mécanismes de rupture.....	115
5.8.3.	Définition du facteur de sécurité de Kranz	115
5.8.4.	Equations de base	116
	Bibliographies	120
	Annexe A – Caractéristiques de clous et épingles couramment utilisés.....	123
	Annexe B – Module de réaction du sol.....	127
	Annexe C – Coefficients de sécurité partiels.....	129
	Annexe D – Accélération sismiques	133
	Annexe E – Développement de la méthode de Carter	134
	Annexe F – Développement de la méthode des perturbations	141

Tables des illustrations

Figure 1 : tâches supplémentaires à l'installation	13
Figure 2 : interface de GeoStab	15
Figure 3 : barre des menus du mode neutre	15
Figure 4 : barre d'outils d'accès rapide de la barre des menus.....	16
Figure 5 : menu contextuel de personnalisation de la barre d'outils d'Accès rapide	16
Figure 6 : onglets principaux de GeoStab.....	16
Figure 7 : barre de menu de l'onglet « Préparation des données »	17

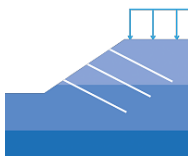


Figure 8 : barre d'outils de l'onglet « Affichage »	18
Figure 9 : options de grilles	18
Figure 10 : choix du pas de la grille.....	18
Figure 11 : option d'affichage supplémentaires	18
Figure 12 : comportement de l'interrupteur « Faire ressortir le terrain naturel ».....	19
Figure 13 : comportement de l'interrupteur « Numéro des segments »	19
Figure 14 : barre d'information	19
Figure 15 : comportement d'accrochage à la grille	19
Figure 16: barre des menus de l'onglet « Outils »	20
Figure 17 : comportement lors de l'inversion du profil.....	20
Figure 18 : exemple d'extension d'un profil.....	20
Figure 19 : zone des 3H.....	21
Figure 20 : Logiciel « ToGeoStab.exe »	22
Figure 21 : fenêtre de gestion des phases et cas	22
Figure 22 : fenêtre d'ajout d'une phase.....	23
Figure 23 : Menu contextuel des phases et cas	24
Figure 24 : fenêtre de propriétés.....	24
Figure 25 : description d'un paramètre.....	25
Figure 26 : liste récapitulative des données	25
Figure 27 : sélection d'un élément dans la liste de données	26
Figure 28 : fenêtre de dessin de GeoStab.....	27
Figure 29 : barre des menus du mode neutre	27
Figure 30 : fenêtre de confirmation lors d'un changement de module de saisie ou de phase/cas	28
Figure 31 : fenêtre de saisie du cartouche	29
Figure 32 : Cartouche de la feuille de sortie	29
Figure 33 : barre des menus du module de caractéristiques du dessin.....	30
Figure 34 : sous-menu de définition des unités.....	30
Figure 35 : sous-menu de définition du cadre de sortie	30
Figure 36 : sous-menu de définition de distorsion.....	30
Figure 37 : sous-menu d'option d'affichage des charges et des sols.....	30
Figure 38 : barre des menus du module de saisie du profil	31
Figure 39 : schéma d'orientation du profil à respecter pour le bon déroulement du calcul.....	31
Figure 40 : fenêtre d'avertissement vis-à-vis des segments verticaux	32
Figure 41 : fenêtre de propriété lors de la saisie de segments	32
Figure 42 : sous-menu d'opérations sur les points du profil.....	33
Figure 43 : étapes de la fusion de points.....	33
Figure 44 : barre des menus du module de saisie des sols	33
Figure 45 : fenêtre de propriétés lors de l'ajout d'un sol	34
Figure 46 : propriétés supplémentaires lors de l'activation du multicritère.....	35
Figure 47 : champ supplémentaire pour définir les valeurs lors de l'activation de l'anisotropie.....	35
Figure 48 : fenêtre d'anisotropie et digramme de correspondance.....	35
Figure 49 : exemple de surface de rupture générées avec un sol anisotropique	36
Figure 50 : champ supplémentaire pour définir les valeurs lors de l'activation de l'option « Cohésion en profondeur ».....	36
Figure 51 : fenêtre de saisie des valeurs de cohésion en fonction de la profondeur	36

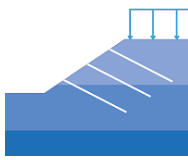


Figure 52 : options de modélisation pour l'évolution de la cohésion en fonction de la profondeur	37
Figure 53: critère théorique de Mohr-Coulomb	37
Figure 54 : champ supplémentaire pour définir les valeurs lors de l'activation de l'option « Angle frot./Pression »	37
Figure 55 : fenêtre de saisie des valeurs de frottement en fonction de la pression.....	38
Figure 56: procédure d'association d'un sol à un segment.....	38
Figure 57 : sous menu d'option d'affichage en saisie et en sortie pour les sols.....	39
Figure 58 : Barre des menus de la saisie des conditions d'eau	39
Figure 59 : sous-menu de saisie des conditions d'eau	39
Figure 60 : menu déroulant des types de saisie des conditions d'eau	39
Figure 61 : fenêtre de renseignement du fichier de pression	40
Figure 62 : exemple d'un fichier d'import de pressions interstitielles	40
Figure 63 : sous-menu de saisie des pressions interstitielles	41
Figure 64 : sous-menu d'association d'une nappe à un sol	41
Figure 65 : aspect d'une nappe sélectionnée	41
Figure 66 : sous-menu d'opérations sur les points d'une nappe	42
Figure 67 : barre de menus du module de saisie des charges.....	42
Figure 68 : création graphique d'une force linéaire	43
Figure 69 : création graphique d'une surcharge	44
Figure 70 : barre des menus du module de saisie des inclusions.....	44
Figure 71 : choix de la position du clou en mode graphique	45
Figure 72 : choix de la longueur du clou en mode graphique	45
Figure 73 : définition de l'inclinaison du clou en mode graphique	45
Figure 74 : comparaison d'un clou fonctionnant en traction et en compression.....	46
Figure 75 : propriétés supplémentaires liées à l'activation du multicritère	46
Figure 76 : propriétés supplémentaires liées à l'activation du calcul des efforts pour les clous.....	47
Figure 77 : fenêtre de définition du parement	47
Figure 78 : définition du parement.....	48
Figure 79: méthodologie de calcul de $T_{0,d}$ suivant la NF P94-270.....	48
Figure 80 : propriétés supplémentaires liées à l'action du calcul de longueur optimum des clous.....	49
Figure 81 : différence entre un clou et une épingle dans GeoStab	49
Figure 82 : représentation des différentes options de tension de précontrainte	50
Figure 83 : fenêtre de la procédure de la vérification de Kranz	51
Figure 84 : procédure de définition de la vérification de Kranz	51
Figure 85 : comparaison de la phase qui a servi de modèle (à gauche) et de la phase créée pour la vérification de Kranz (à droite).....	52
Figure 86 : fenêtre de définition des surfaces de ruptures pour la vérification de Kranz	52
Figure 87 : définition graphique du second point de la zone d'entrée des surfaces de rupture pour la vérification de Kranz.....	53
Figure 88 : choix graphique du point de sortie des surfaces de ruptures pour la vérification de Kranz	53
Figure 89 : choix de la force représentant le tirant en mode graphique pour la vérification de Kranz.....	53
Figure 90 : Représentation des résultats de la vérification de Kranz dans la feuille de sortie de calcul	54
Figure 91 : procédure de définition graphique d'un massif géosynthétique	55
Figure 92 : propriétés particulières du massif en sol renforcé.....	55
Figure 93 : barre des menus du module de saisie des conditions sismiques	56

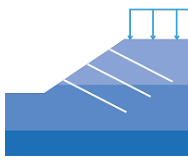


Figure 94 : fenêtre de propriétés lors de l'ajout des conditions de séisme	56
Figure 95 : différences entre un séisme pesant et allégeant	57
Figure 96 : barre des menus du module de saisie des coefficients partiels	58
Figure 97 : fenêtre de saisie des coefficients de sécurité partiels.....	58
Figure 98 : fenêtre de choix d'approche pour les Eurocodes.....	59
Figure 99 : fenêtre de répartition des éléments	60
Figure 100 : fenêtre de choix de la combinaison	60
Figure 101 : sous-menu de gestion de l'enveloppe.....	60
Figure 102 : construction graphique d'une enveloppe.....	61
Figure 103 : fusion des polygones d'une enveloppe en un seul.....	61
Figure 104 : fenêtre de saisie des coefficients partiels de sécurité à l'intérieur de l'enveloppe	61
Figure 105 : fenêtre de choix de combinaison de la norme XP P94-270 pour l'enveloppe	62
Figure 106 : barre des menus du module de saisie des surfaces de ruptures	62
Figure 107 : liste déroulante de choix du mode de génération	62
Figure 108 : fenêtre de propriétés du mode « Génération par intervalles d'entrée sortie ».....	63
Figure 109 : changement de propriété lié au choix de l'axe de référence	63
Figure 110 : ajout de propriétés à définir lors de l'activation de la propriété « Tracer la courbe »	64
Figure 111 : exemple d'une courbe de facteur de sécurité sur la feuille de sortie.....	64
Figure 112 : saisie graphique de la zone d'entrée selon l'axe X.....	64
Figure 113 : saisie graphique de la zone d'entrée selon l'axe Y	64
Figure 114 : fenêtre de propriétés du mode « Génération par les centres ».....	65
Figure 115 : propriétés spécifiques à la méthode de génération « Définition par les rayons »	66
Figure 116 : propriétés spécifiques à la méthode de génération « Points de passage imposé pour le rayon minimum »	66
Figure 117 : propriétés spécifiques à la méthode de génération « Rayon minimum tangent au terrain naturel »	66
Figure 118 : propriétés spécifiques à la méthode de génération « Rayon minimum tangent au toit d'une couche »	66
Figure 119 : ajout graphique d'une boîte de centre.....	66
Figure 120 : apparence de la boîte de centres sur la feuille de sortie	67
Figure 121 : fenêtre de propriétés du mode « Génération par intervalles d'entrée/sortie (spirales logarithmiques) »	67
Figure 122 : comparaison des options « positive (courbée à l'aval) » et « négative (courbée à l'amont) »	68
Figure 123 : schéma représentant la manière de générer les surfaces de ruptures du type « Plans et coins de poussée-butée ou Plans et cercles ».....	68
Figure 124 exemple de surfaces générées via le mode « Plans et coins de poussée-butée ou Plans et cercles » avec l'option « Type de plans ».....	69
Figure 125 : exemple de surfaces générées via le mode « Plans et coins de poussée-butée ou Plans et cercles » avec l'option « Plans et cercles ».....	69
Figure 126 : saisie d'une boîte de passage	69
Figure 127 : première étape de saisie graphique d'une boîte de passage.....	70
Figure 128 : seconde étape de saisie graphique d'une boîte de passage	70
Figure 129 : fenêtre de propriété du mode de génération de surfaces de ruptures « Surfaces définies par des points ».....	70
Figure 130 : exemple de surface de rupture définie par des points	71

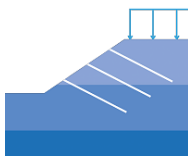


Figure 131 : fenêtre de propriété du mode de génération de surfaces de ruptures « Surfaces aléatoire ».....	71
Figure 132 : barre des menus du module de saisie des étiquettes	72
Figure 133 : fenêtre de propriété lors de l'ajout d'une étiquette	72
Figure 134 : barre des menus du module d'ajout de sondages	72
Figure 135 : fenêtre de choix des phases et cas à calculer	73
Figure 136 : liste récapitulative des erreurs de calcul	74
Figure 137 : Exemple d'un warning	74
Figure 138 : fenêtre d'échec du calcul	74
Figure 139 : fenêtre de visualisation des résultats lors de l'échec d'un calcul.....	75
Figure 140 : interface du logiciel en sortie de calculs.....	75
Figure 141 : exemple de l'utilisation de l'affichage des efforts max	76
Figure 142 : affichage du diagramme de Culmann.....	76
Figure 143 : affichage des longueurs internes et externes des clous	76
Figure 144 : sous-menu d'impression	77
Figure 145 : fenêtre des phases et cas de la sortie de calcul	77
Figure 146 : exemple d'une feuille de sortie	78
Figure 147 : forces considérées pour l'équilibre limite	80
Figure 148 : discrétisation de la surface de rupture en tranches et linéarisation de la base des tranches	83
Figure 149 : forces agissant sur une tranche	84
Figure 150 : forces considérées pour la méthode ordinaire des tranches	88
Figure 151 : forces agissant sur les tranches d'extrémité.....	89
Figure 152 : forces dans une tranche par rapport à un point arbitraire	92
Figure 153 : forces prises en compte pour la modélisation numérique	93
Figure 154 : forces agissant sur une tranche	95
Figure 155 : définition de la nappe sur la totalité des abscisses.	99
Figure 156 : définition du coefficient ru.....	100
Figure 157 : types d'inclusions prises en compte par GeoStab.....	101
Figure 158 : interaction sol / inclusion.....	102
Figure 159 : représentation graphique du critère global de rupture sol-inclusion.....	103
Figure 160 : résistance propre de l'inclusion	104
Figure 161 : déformée de l'inclusion, déplacement relatif $2 y_0$	106
Figure 162 : méthode des boîtes de centre.....	108
Figure 163: méthodes des intervalles d'entrée et de sortie	109
Figure 164 : surfaces non-circulaires, méthode des boîtes.....	110
Figure 165 : Bishop simplifiée -prise en compte de l'effet des séismes par rotation de l'ensemble (selon recommandation AFPS).	111
Figure 166 : effort T0	113
Figure 167 : effort T1	113
Figure 168 : optimisation de la longueur des clous	114
Figure 169 : mode de rupture.....	115
Figure 170 : équilibre du massif	116
Figure 171 : efforts sur le massif.....	118
Figure 172 : lits d'ancrages multiples.....	119

Tableau 1 : Configuration minimal pour installation de GeoStab	13
--	----

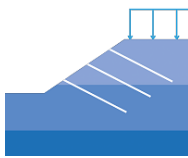
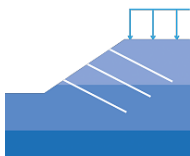


Tableau 2 : limite de la taille des structures de données dans GeoStab	14
Tableau 3 : récapitulatifs des équations et des inconnues pour les tranches.....	85
Tableau 4 : vérifications minimales à effectuer aux états limites ultimes pour les projets durables ou transitoires	98



Copyright

Le logiciel **Ghosta**, développé par la société **GEOS INGENIEURS CONSEILS**, est protégé au titre des droits d'auteurs appliqués aux logiciels informatiques.

Toute utilisation sans licence, même partielle, est interdite sans autorisation préalable. Toute reproduction ou imitation des sorties graphiques et fichiers résultats constitue une contrefaçon passible des peines prévues par la loi.

La société **GEOS INGENIEURS CONSEILS** a fait tout son possible pour fournir un logiciel de qualité et conforme aux réglementations en vigueur ainsi qu'un manuel complet. Cependant, celle-ci décline toute responsabilité quant à l'utilisation du logiciel **Ghosta** et aux réalisations découlant de son utilisation.

Dans ce manuel, les données ne sont fournies qu'à titre d'exemple et ne dispensent pas l'utilisateur de définir les paramètres d'entrée du logiciel **GeoStab**.

Avertissements

GeoStab est un outil pour calculer les contraintes d'un objet simple par application de méthodes de calcul définies ; l'objet simple de calcul est défini par l'ingénieur qui retient quelques caractéristiques mécaniques et géométriques et envisage certains phénomènes physiques.

Cet objet simple ne représente pas un objet réel, tel qu'un talus, une pente ou un fond de fouille. Il reste un objet virtuel, permettant à un ingénieur d'évaluer le comportement d'un objet réel.

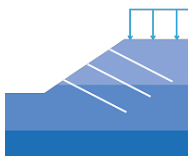
GeoStab applique des méthodes de calcul définies à un objet virtuel simple.

Il appartient à l'ingénieur d'apprécier si l'outil de calcul **GeoStab** est utilisable pour modéliser le comportement de l'ouvrage.

L'ingénieur doit définir les phénomènes physiques qu'il prend en compte pour concevoir son ouvrage ; il définit l'objet modèle.

L'ingénieur doit apprécier si le choix de la méthode de calcul utilisée par **GeoStab** est compatible avec l'ouvrage réel.

L'ingénieur choisit l'outil de calcul qui lui paraît adapté. Il opère seul la modélisation de l'objet réel (processus de réduction d'un objet réel à un objet virtuel simple) ; il décide seul de prendre en compte le résultat obtenu sur l'objet virtuel simple pour définir le comportement de l'objet réel.



Introduction

Le logiciel **GeoStab** permet de calculer le coefficient de sécurité sur la stabilité :

- Des **pent**es,
- Des **talus de déblais** et de **remblais renforcés** ou non,
- Des **murs de soutènement** éventuellement ancrés,
- Des **parois clouées ou tirantées** (avec calcul de la longueur optimisée des clous),
- Des **massifs de terrain** soumis au tirantage selon la méthode de KRANZ.

La gestion des phases et des cas de calcul permet de simplifier l'étude d'un projet, puisqu'en un seul fichier, il est possible d'envisager, par simple activation ou désactivation d'éléments :

- Diverses configurations géométriques,
- Plusieurs comportements de sols,
- Différentes sollicitations (statique, sismique),
- Des méthodes de calcul distinctes.

La modélisation des sols peut être plus ou moins avancée :

- L'introduction de **paramètres géotechniques** simples (poids volumique, cohésion, angle de frottement) peut suffire à lancer les calculs,
- Une **anisotropie** de cohésion et/ou d'angle de frottement est modélisable pour les sols rocheux,
- Une variation de la cohésion en **fonction de la profondeur** et de l'angle de frottement en **fonction de la pression** de couverture peut être introduite dans des modèles plus fins.

L'effet de **l'eau** est pris en compte par :

- La différence de niveaux entre la ou les nappes et la base des tranches,
- L'introduction d'une pression interstitielle constante u ou d'un paramètre de pression r_u dans le sol,
- L'introduction des pressions interstitielles selon un semis de points résultant d'un calcul par différences finies ou éléments finis.

Les **surcharges** peuvent être introduites :

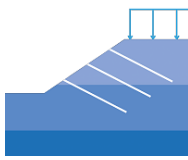
- Par des forces linéaires,
- Par des surcharges,
- Par une hauteur d'eau au-dessus du terrain naturel.

L'effet du **séisme** est pris en compte par un calcul pseudo statique avec :

- Pour les surfaces circulaires, rotation de la géométrie selon les recommandations de l'AFPS ou Eurocode 8 sauf si cela conduit à des surplombs, dans ce cas, le séisme est pris en compte par ajout d'un moment extérieur dans les équations d'équilibre,
- Pour les surfaces non circulaires, ajout des forces sismiques dans les équations d'équilibre.

Les **renforcements** peuvent être de différentes natures :

- Inclusions subhorizontales (clous) ou subverticales (inclusions rigides, profilés, ...),



- Tirants,
- Épingles,
- Géotextiles,
- Terre-Armée.

Les **coefficients partiels** choisis peuvent être :

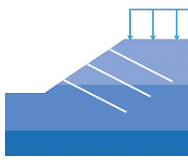
- Issus de l'application de la réglementation Eurocode 7,
- Issus des recommandations CLOUTERRE,
- Différents entre l'intérieur et l'extérieur d'une enveloppe définie par l'utilisateur,
- Personnalisables.

Les **surfaces de rupture** peuvent être :

- Circulaires et inconnues avec une recherche par une boîte de centres ou par intervalles d'entrées/sorties,
- Circulaires et connues avec calcul du facteur de sécurité en fonction des coordonnées du cercle,
- En spirales logarithmiques avec une recherche par intervalles d'entrées/sorties,
- Non circulaires avec un ou des plans prolongés à l'amont par un coin de poussée et à l'aval par un coin de butée ou par des cercles,
- Suivant des plans définis point par point,
- Aléatoires.

Les **méthodes** de calcul sont :

- **BISHOP** modifiée avec pour facteur initial des itérations FELLENIUS pour les surfaces circulaires,
- **CARTER** pour les surfaces non circulaires (extension de la méthode de BISHOP modifiée),
- **PERTURBATIONS** aussi bien pour les surfaces circulaires que non-circulaires.



1. Installation

1.1. Configuration minimale

Système d'exploitation	> Windows 7
Stockage	> 100 Mo
Mémoire vive	> 2 Go
Environnements	Serveurs / Machines virtuels / RDP/ TSE

Tableau 1 : Configuration minimal pour installation de GeoStab

1.2. Installation du logiciel

L'installation du logiciel s'effectue à partir de l'exécutable d'installation disponible au lien suivant : [GeoStab](#)

Lors de l'exécution du fichier d'installation, il vous sera proposer d'effectuer des tâches supplémentaires :

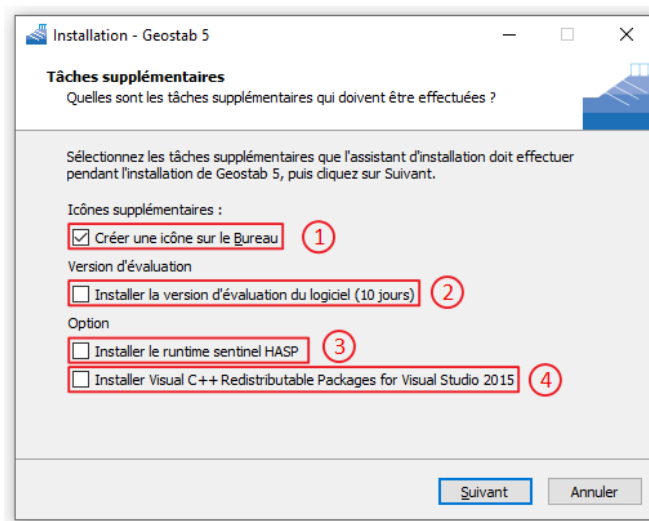
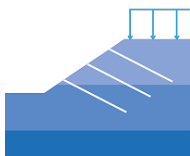


Figure 1 : tâches supplémentaires à l'installation

- ① (Optionnel) Crée un raccourci vers l'exécutable du logiciel sur votre bureau
- ② (Optionnel) Installe la version d'essai du logiciel vous permettant d'essayer le logiciel pendant une période de 10 jours suivant la première exécution. Il n'est pas possible d'installer la version d'essai sur une machine virtuelle
- ③ (Nécessaire à la première installation d'un logiciel GEOS) Installe le « Runtime Sentinel HASP » indispensable à la reconnaissance de vos licences
- ④ (Optionnel) Installe les bibliothèques graphiques Visual C++ indispensables au fonctionnement du logiciel

Par défaut, le dossier d'installation se trouve au chemin suivant : **C:\Program Files (x86)\GEOS\GeoStab 5**



2. Interface

Avant-propos : Il est recommandé d'utiliser le **kilonewton** (« **kN** ») ainsi que le **mètre** (« **m** ») conformément au Système International. Cependant, aucune unité n'est imposée, le système d'unités devant rester homogène aux unités ci-dessus, et ce pour l'ensemble de la saisie du modèle.

La structure du logiciel impose une limitation sur la taille des données décrite dans le tableau ci-dessous :

Nombre de points de la géométrie	200
Nombre de sols	30
Nombre de nappes	5
Nombre de clous + épingles	40
Nombre de tirants	20
Nombre de nappes de massifs géotextiles	60
Nombre de nappes de massifs en sols renforcés	60
Nombre de nappes de massifs en fils tressés	60
Nombre de nappes de massifs treillis	60
Nombre de forces linéaires	20
Nombre de surcharges	20
Nombre de phases	40
Nombre de cas par phase	20

Tableau 2 : limite de la taille des structures de données dans GeoStab

2.1. Description générale de l'interface

GeoStab se compose de plusieurs éléments d'interface interactifs visant à faciliter la saisie du modèle. Ces éléments sont regroupés en 5 parties.

- Une barre de menus
- Une fenêtre de gestion des phases et cas
- Une fenêtre de propriétés
- Une fenêtre récapitulative des données
- Une fenêtre graphique

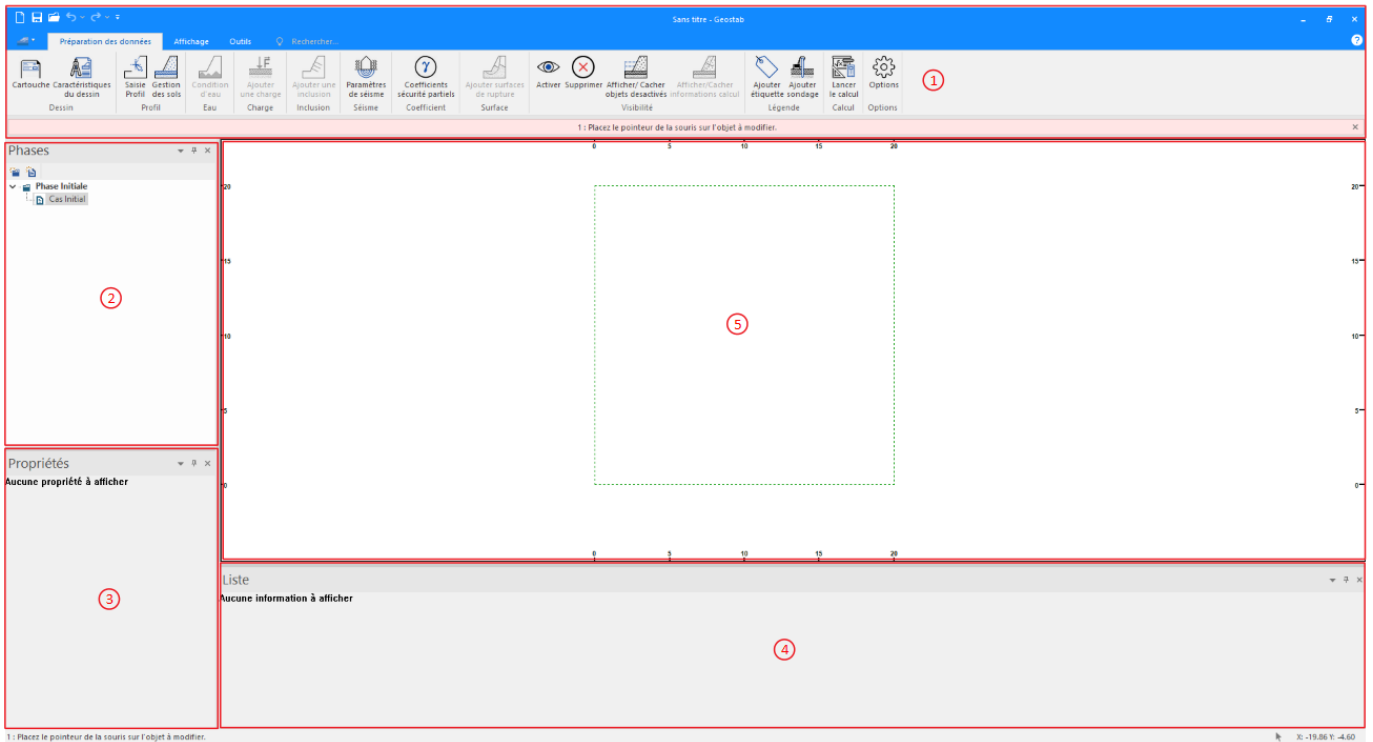
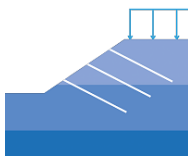


Figure 2 : interface de GeoStab

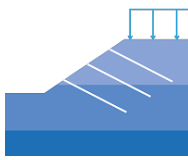
- ① Barre des menus (2.1.1)
- ② Fenêtre des phases et cas (2.1.2)
- ③ Fenêtre des propriétés (2.1.3)
- ④ Fenêtre récapitulative des données (2.1.4)
- ⑤ Fenêtre graphique (2.1.5)

2.2. Barre des menus



Figure 3 : barre des menus du mode neutre

- ① Créer un nouveau fichier, sauvegarder, ouvrir un fichier, annuler et rétablir (2.1.1.1)
- ② Onglets « Préparation des données », « Affichage », « Outils » et barre de Recherche (2.1.1.2)
- ③ Barre de menus principale (2.1.1.2)
- ④ Barre d'aide et d'informations (2.1.1.2.2)
- ⑤ Nom du fichier



2.2.1. Ouverture, sauvegarde de fichiers, annuler et rétablir

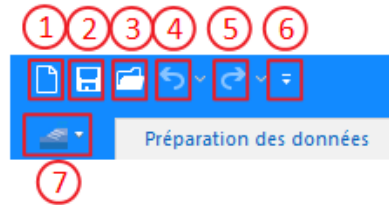


Figure 4 : barre d'outils d'accès rapide de la barre des menus

- ① Permet d'ouvrir un nouveau fichier vierge
- ② Permet de sauvegarder le fichier
- ③ Permet d'ouvrir un fichier
- ④ Permet d'annuler la dernière opération
- ⑤ Permet de rétablir la dernière opération annulée
- ⑥ Permet de personnaliser l'affichage des boutons précédents via le menu contextuel ci-dessous

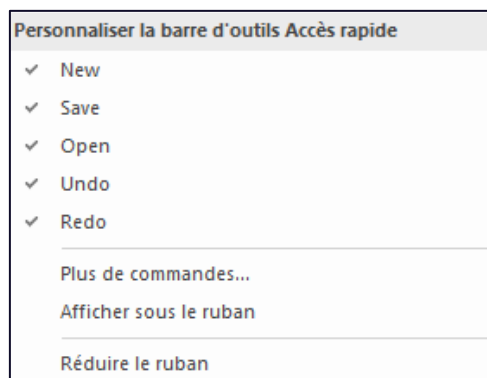


Figure 5 : menu contextuel de personnalisation de la barre d'outils d'Accès rapide

- ⑦ Permet d'accéder à l'interface de gestion du fichier

2.2.2. Onglet « Préparation des données », « Affichage » et « Outils »

Le logiciel se compose des 3 onglets qui changent les options disponibles dans la barre de menus principale :

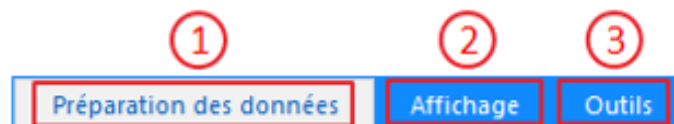
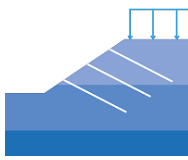


Figure 6 : onglets principaux de GeoStab

- ① **Préparation des données** : onglet principal regroupant les boutons permettant d'accéder aux différents modules du logiciels pour la saisie du modèle
- ② **Affichage** : onglet secondaire permettant de gérer l'affichage d'éléments d'interface
- ③ **Outils** : onglet secondaire regroupant des outils



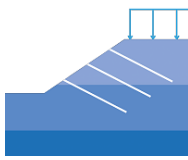
2.2.2.1. Préparation des données

L'onglet « Préparation des données » vous permet d'accéder aux différents modules de saisie. Lorsqu'aucun module de saisie n'est sélectionné, la barre des menus à l'allure suivante :



Figure 7 : barre de menu de l'onglet « Préparation des données »

- ① **Cartouche** : saisie du cartouche ([3.2](#))
- ② **Caractéristique du dessin** : configuration générale du dessin ([3.3](#))
- ③ **Saisie Profil** : saisie de la géométrie du modèle ([3.4](#))
- ④ **Gestion des sols** : définition des caractéristiques de sol et association à la géométrie ([3.5](#))
- ⑤ **Condition d'eau** : ajout de nappe et définition des pressions interstitielles ([3.6](#))
- ⑥ **Ajouter une charge** : ajout de forces linéaires ou de surcharges ([3.7](#))
- ⑦ **Ajouter une inclusion** : ajout d'un clou, d'une épingle, d'un tirant ou de massifs géotextile, en terre renforcée, en treillis, en fil tressé ([3.8](#))
- ⑧ **Paramètres de séismes** : définition des conditions sismiques ([3.9](#))
- ⑨ **Coefficients sécurité partiels** : définition des coefficients de sécurité partiel ([3.10](#))
- ⑩ **Ajout surfaces de rupture** : définition du type de génération de surfaces de ruptures et de la méthode de calcul ([3.11](#))
- ⑪ **Activer** : activer ou désactiver des éléments du modèle
- ⑫ **Supprimer** : supprimer un élément du modèle
- ⑬ **Afficher/Cacher objets désactivés** : active ou désactive la visibilité des éléments inactifs
- ⑭ **Afficher/Cacher informations calcul** : active ou désactive l'affichage des informations sur le dessin lié aux résultats de calcul
- ⑮ **Ajouter étiquette** : permet d'ajouter des commentaires sur le dessin ([3.12](#))
- ⑯ **Ajouter sondage** : permet d'ajouter la représentation d'un sondage ([3.13](#))
- ⑰ **Lancer le calcul** : permet de choisir les cas à calculer et de lancer leurs calculs ([4.1](#))
- ⑱ **Options** : permet d'accéder aux options



2.2.2.2. Affichage

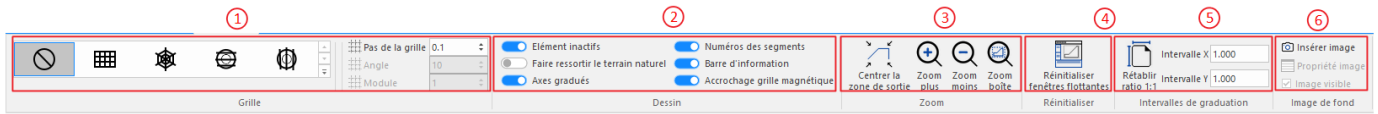


Figure 8 : barre d'outils de l'onglet « Affichage »

① **Configuration de la grille** : par défaut, la grille n'est pas visible, bien qu'elle conditionne le tracé en imposant un pas de mesure. L'élément d'interface ci-dessous permet d'afficher différent type de grille.

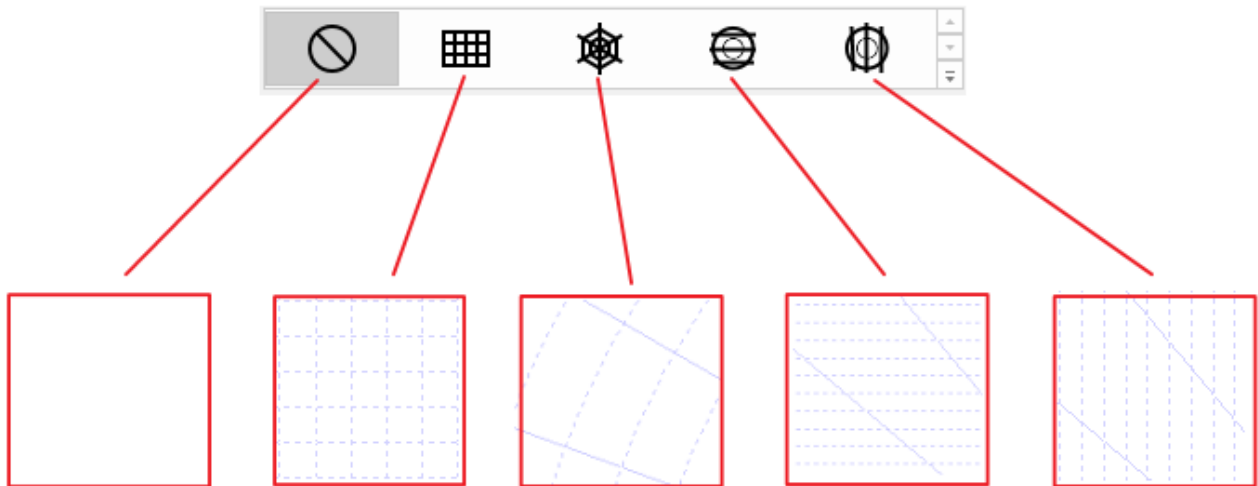


Figure 9 : options de grilles

Les 3 champs ci-dessous permettent de configurer la grille suivant le type retenu. Ces valeurs impactent l'incrément de valeurs engendré par les mouvements de souris lors de la saisie graphique.

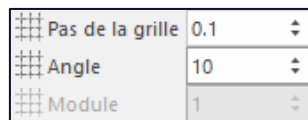


Figure 10 : choix du pas de la grille

② Activer ou désactiver l'affichage des informations supplémentaires du modèle.

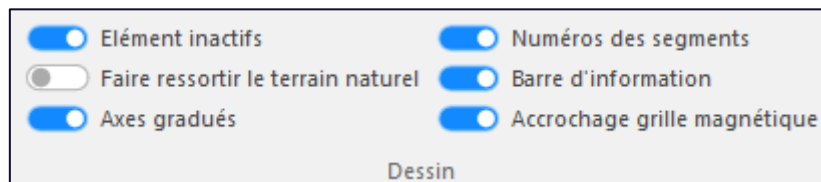


Figure 11 : option d'affichage supplémentaires

Le menu se compose de 6 interrupteurs permettant :

- **Éléments inactifs** : active ou désactive l'affichage des éléments inactifs du modèle
- **Faire ressortir le terrain naturel** : affiche les segments qui composent le terrain naturel en un trait noir continu permettant notamment de dénicher des éventuelles discontinuités du terrain naturel du modèle

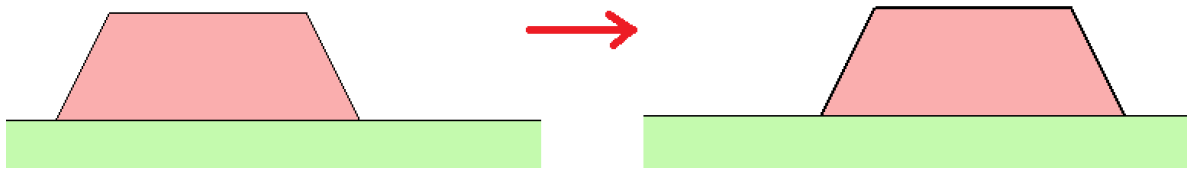
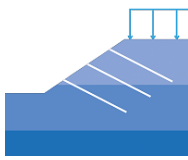


Figure 12 : comportement de l'interrupteur « Faire ressortir le terrain naturel »

- **Axes gradués** : active ou désactive l'affichage des axes gradués
- **Numéros des segments** : active ou désactive l'affichage des numéros des segments.

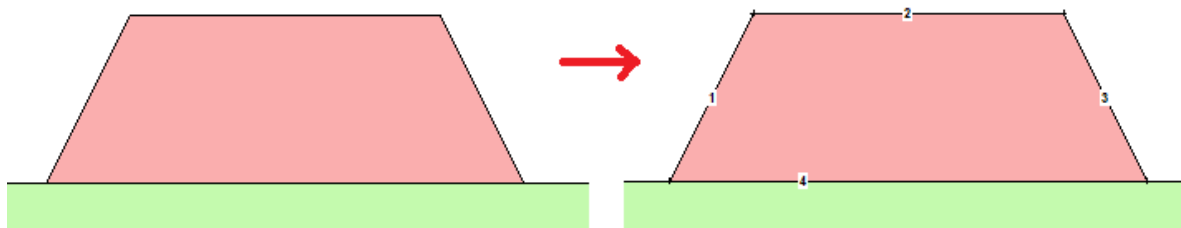


Figure 13 : comportement de l'interrupteur "Numéro des segments"

- **Barre d'information** : active ou désactive l'affichage de la barre d'information

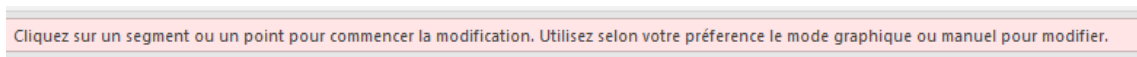


Figure 14 : barre d'information

- **Accrochage grille magnétique** : active ou désactive l'accrochage automatique de vos éléments créés graphiquement aux nœuds de la grille

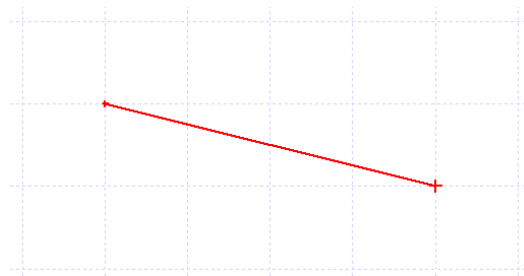
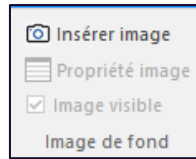
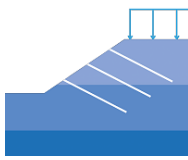


Figure 15 : comportement d'accrochage à la grille

- ③ **Option de zoom** : permet de gérer le zoom ainsi que le centrage de la fenêtre graphique
- ④ **Réinitialiser les fenêtres flottantes** : permet de replacer les fenêtres d'interfaces à leurs positions par défaut
- ⑤ **Gestions des graduations** : permet de gérer les intervalles de graduations en abscisses et en ordonnées de la grille
- ⑥ **Image d'arrière-plan** : permet d'afficher et de configurer une image de fond



L'image chargée par GeoStab 5 doit être au format « .bmp » (bitmap). Dans le cas contraire, il convient de la convertir avant chargement dans le logiciel.

L'image en arrière-plan peut ensuite être repositionnée ou redimensionnée dans GeoStab à partir du menu « Propriété image ».

2.2.2.3. Outils

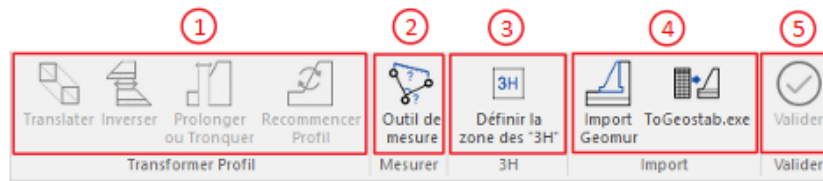


Figure 16: barre des menus de l'onglet « Outils »

① **Transformer Profil** : permet la manipulation du modèle dans son ensemble :

- **Traduire** : translation horizontale ou verticale
- **Inverser** : inversion en miroir (cf Figure 17 : comportement lors de l'inversion du profil)
- **Prolonger ou Tronquer** : prolongation ou raccourcissement (Figure 18 : exemple d'extension d'un profil)
- **Recommencer Profil** : suppression

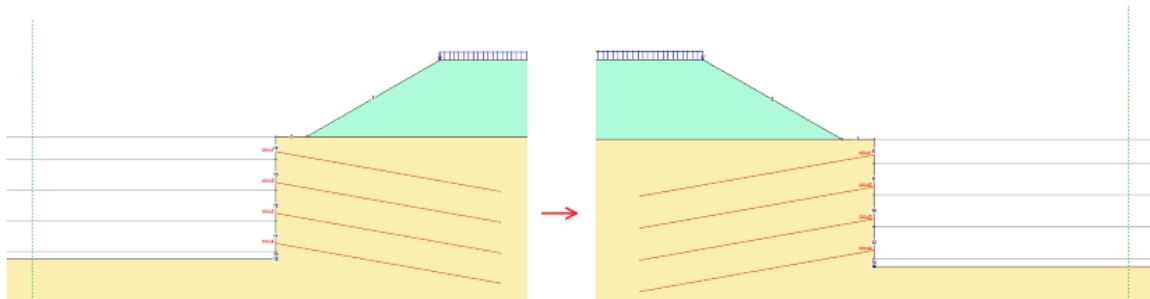


Figure 17 : comportement lors de l'inversion du profil

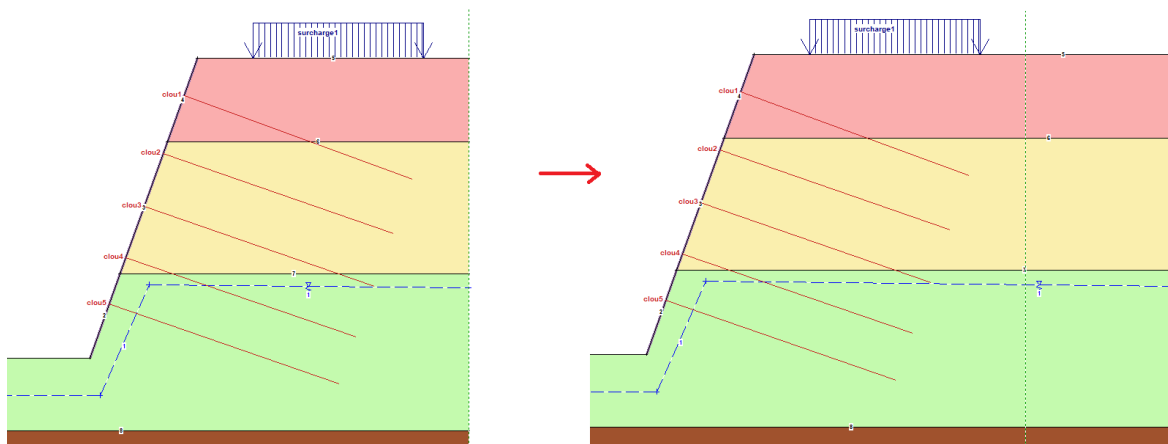
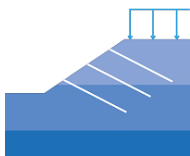


Figure 18 : exemple d'extension d'un profil



② **Outil de mesure** : permet de mesurer la différence de position entre 2 points sélectionnés graphiquement : distance verticale, horizontale, totale, angle.

③ **Définir la zone des 3H** : permet de définir la zone des 3h à partir d'une hauteur définie

Après avoir utilisé le bouton **Définir la zone des 3H**, le logiciel demande la saisie d'un rectangle de hauteur H (correspondant généralement à la hauteur du talus). Le logiciel fait alors figurer, par un trait orange, le volume de sol potentiellement impacté par un glissement (**Figure 19 : zone des 3H**).

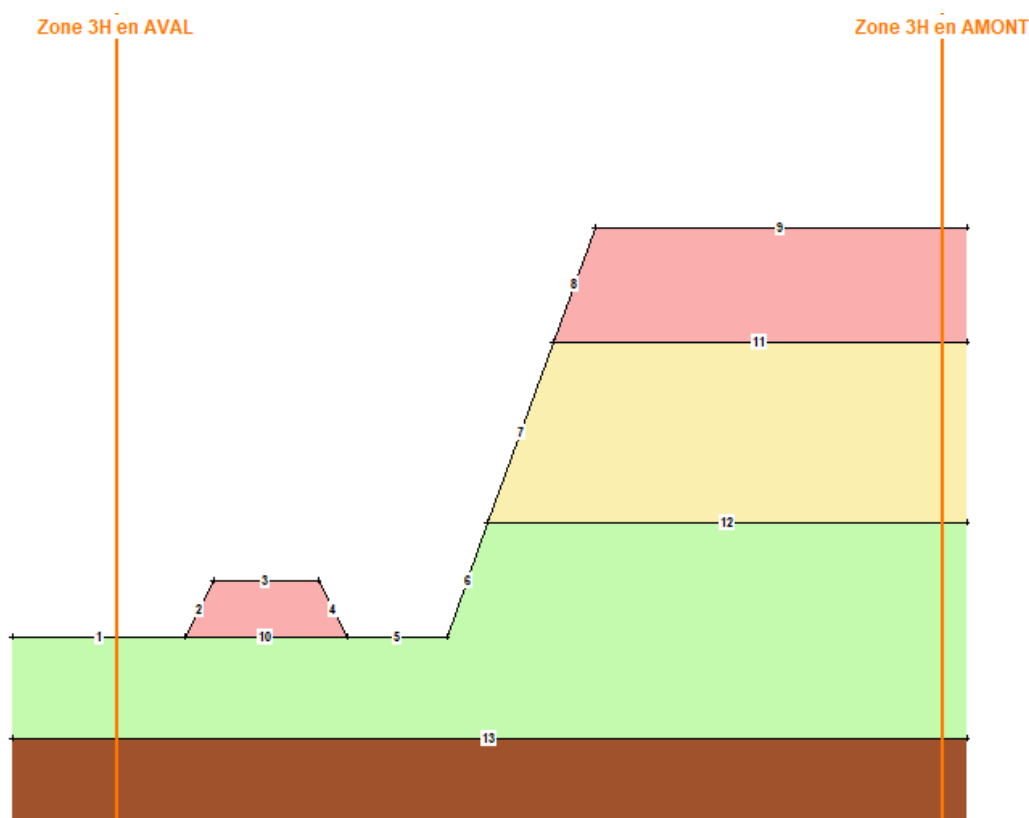
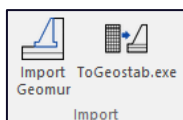


Figure 19 : zone des 3H

④ **Import** : permet d'importer une géométrie de profil.



Le menu se compose de 2 boutons :

- **Import GeoMur** : vous permet d'importer des fichiers créés à l'aide du logiciel GeoMur développé par GEOS (« .gmr ») afin d'effectuer la vérification de la stabilité générale d'un ouvrage de soutènement.
- **ToGeoStab.exe** : vous permet de lancer l'application « ToGeoStab » depuis GeoStab (**Figure 20 : Logiciel « ToGeoStab.exe »**). Elle vous permet d'importer une géométrie depuis des fichiers AutoCad ou Excel.

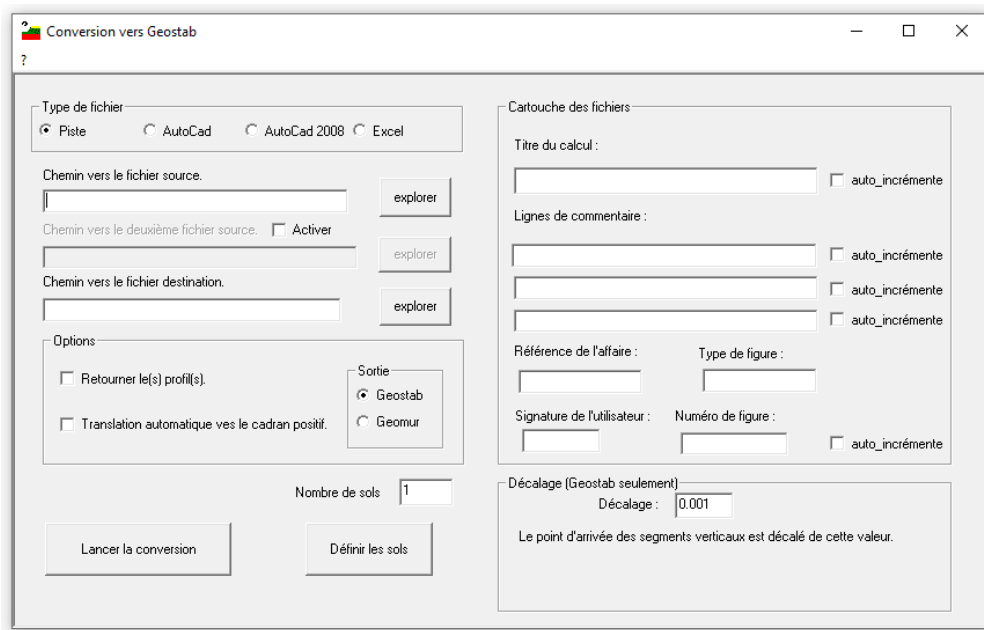
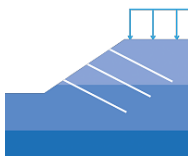


Figure 20 : Logiciel « ToGeoStab.exe »

Vous pouvez trouver la documentation de l'application **ToGeoStab** dans le dossier d'installation du logiciel.

2.2.3. Fenêtre de gestion des phases et des cas

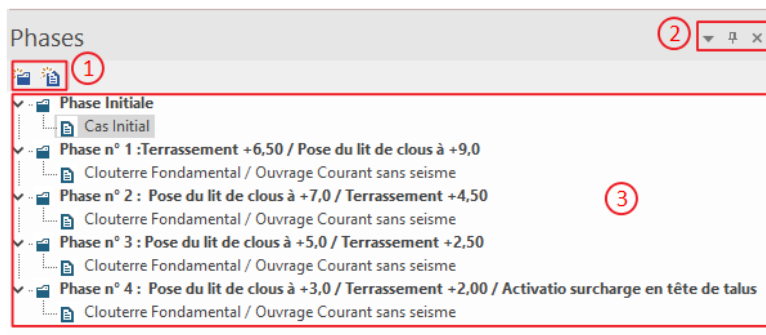


Figure 21 : fenêtre de gestion des phases et cas

① Raccourci des créations de phases et de cas, permet d'ajouter une phase ou un cas

Le bouton  permet d'ajouter une phase à la suite de la phase actuellement sélectionnée (appelée phase courante). La fenêtre suivante apparaît :

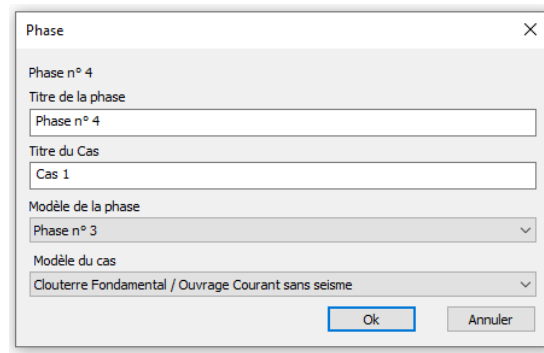
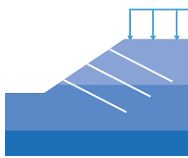


Figure 22 : fenêtre d'ajout d'une phase

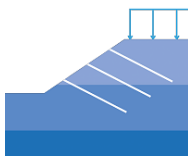
Nota : une nouvelle phase est toujours dupliquée à partir d'une phase et d'un cas existants.

Le bouton () permet d'ajouter un cas à la phase courante.

② Options de gestion de la position de la fenêtre. Les 3 boutons ont pour rôle la gestion de l'affichage et de la position de la fenêtre :

③ Liste des phases et cas du fichier

Les phases sont symbolisées par l'icône () et les cas par l'icône (). Le cas courant, est représenté par un affichage en surbrillance grisée.



Il est possible d'agir sur le phasage par un clic droit sur une phase ou un cas de la liste : insérer une phase ou un cas avant ou après la phase ou le cas courant, modifier les informations d'une phase ou d'un cas, supprimer une phase ou un cas

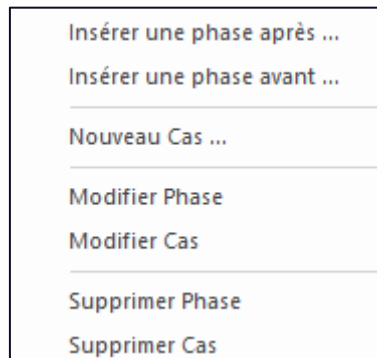


Figure 23 : Menu contextuel des phases et cas

2.2.4. Fenêtre de propriétés

La fenêtre de propriétés permet la saisie de la grande majorité des caractéristiques des éléments constituant le modèle.

La plupart des éléments du modèles peuvent être saisis de manière graphique (via la fenêtre graphique) ou manuelle (via la fenêtre de propriétés). Lors d'une saisie graphique, la fenêtre de propriété s'actualise en direct.

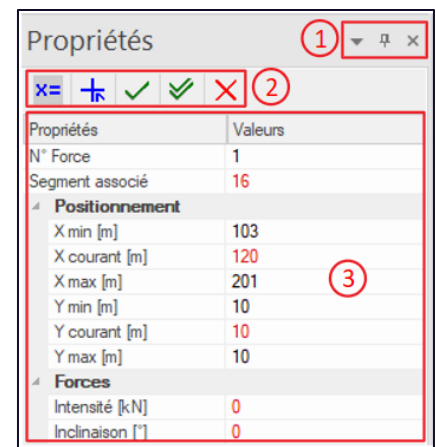


Figure 24 : fenêtre de propriétés

2.2.4.1. Option de la fenêtre de propriétés

① Options de gestion de la position de la fenêtre

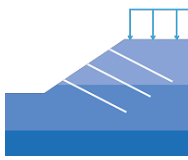
Identiques à celle de la fenêtre des phases (cf. [2.1.2.2](#) ②).

2.2.4.2. Boutons de la fenêtre de propriétés

② Boutons des propriétés, validation, annulation et changement de mode de saisie

Les boutons de la fenêtre de propriétés disponibles dépendent de l'objet en cours de manipulation. On dénombre 5 boutons :

- Permet le passage à la **saisie manuelle**
- Permet le passage à la **saisie graphique**
- Valide les propriétés en les appliquant uniquement à la phase courante
- Valide les propriétés en les appliquant à toutes les phases
- Annule les modifications



2.2.4.3. Liste de propriétés

- ③ Liste les propriétés relatives à un objet sélectionné

Elle prend la forme d'un tableau à 2 colonnes, la première contenant l'intitulé du paramètre et la deuxième sa valeur (modifiable ou non par l'utilisateur suivant le paramètre considéré).

Si la valeur d'un paramètre est modifiable elle est affichée en rouge ; elle est affichée en noir sinon.

Nota : en cas de doute sur la signification d'un paramètre, un clic gauche sur ce dernier permet d'afficher son descriptif sous la liste des propriétés.

Propriétés	Valeurs
Profil	
Segment :	2
X gauche [m]	5
Y gauche [m]	6.4
X droite [m]	8.3
Y droite [m]	12.1
Inclinaison [°]	59.9
Ecart horizontal [m]	3.3
Ecart vertical [m]	5.7
Prolonger à	☐ Gauche

X gauche [m]
Abscisse du point gauche du segment en [m]

Figure 25 : description d'un paramètre

2.2.5. Liste récapitulative des données

La liste récapitulative permet de disposer d'un listing des différents éléments constituant le modèle et de leurs propriétés. Les objets affichés dans cette fenêtre dépendent du module de saisie actif (expl. menu saisie inclusions).

Type	Número	Actif	Segment associé	X[m]	Y[m]	Longueur[m]	Inclinaison[°]	Espacement horizontal[m]	Diamètre du forage[m]	Traction limite[kN]
Clou	1	☒	14	101.00	9.00	15	10	2	0.13	628
Clou	2	☐	13	101.00	7.00	15	10	2	0.13	628
Clou	3	☐	12	101.00	5.00	15	10	2	0.13	628
Clou	4	☐	11	101.00	3.00	9	10	2	0.13	628

Figure 26 : liste récapitulative des données

2.2.5.1. Option de la liste récapitulatives des données

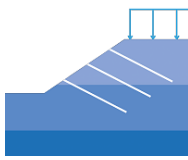
- ① Option de la fenêtre : options de gestion de la position de la fenêtre

Identiques à celle de la fenêtre des phases (cf. 2.1.2.2 ②).

2.2.5.2. Boutons de la liste récapitulatives des données

- ② Bouton de changement de liste : permet sélectionner la liste à afficher

Nota : cette option n'est disponible que pour afficher les différentes listes d'un module de saisie donnée. Elle ne permet pas de naviguer entre toutes les listes du modèle.



En pratique, elle concerne deux modules de saisie :

- Les **charges** :

-  , le bouton des forces permettant de charger la liste des forces du modèle
-  , le bouton des surcharges permettant de charger la liste des surcharges du modèle

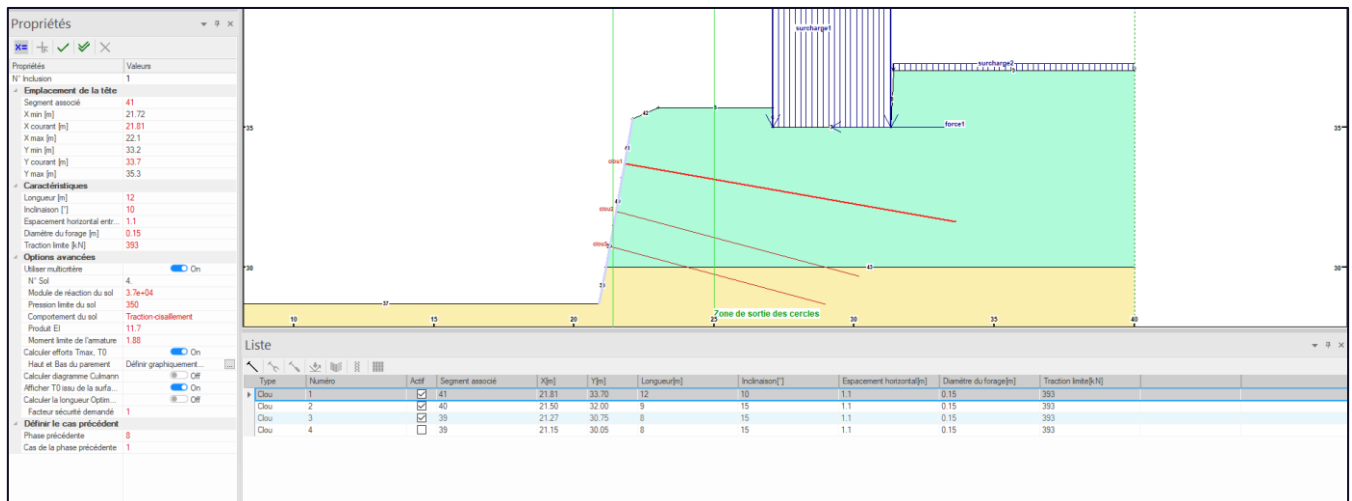
- Les **inclusions** :

-  , Liste des clous
-  , Liste des épingles
-  , Liste des tirants
-  , Liste des massifs en géotextile
-  , Liste des massifs en sol renforcé
-  , Liste des massifs en fil tressé
-  , Liste des massif treillis

2.2.5.3. Liste des objets

③ Liste des objets et de leurs paramètres

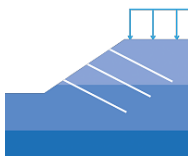
En plus de proposer un résumé des objets constitutifs du modèle, elle permet de sélectionner ces derniers afin de les rendre modifiables via la fenêtre des propriétés.



The screenshot shows the 'Liste' window in GeoStab 5. It contains a table with the following columns: Type, Numéro, Actif, Segment associé, X[m], Y[m], Longueur[m], Inclinaison[°], Espacement horizontal[m], Diamètre du forage[m], and Traction limite [kN]. The table lists four objects of type 'Clou' (Nails).

Type	Numéro	Actif	Segment associé	X[m]	Y[m]	Longueur[m]	Inclinaison[°]	Espacement horizontal[m]	Diamètre du forage[m]	Traction limite [kN]
Clou	1	☒	41	21.81	33.70	12	10	1.1	0.15	393
Clou	2	☒	40	21.50	32.00	9	15	1.1	0.15	393
Clou	3	☒	39	21.27	30.75	8	15	1.1	0.15	393
Clou	4	☐	38	21.15	30.05	8	15	1.1	0.15	393

Figure 27 : sélection d'un élément dans la liste de données



2.2.6. Fenêtre graphique

La fenêtre de dessin est interactive. Elle permet de rendre compte de l'apparence du modèle, mais peut également être modifiée par l'ajout, la modification ou la suppression d'éléments.

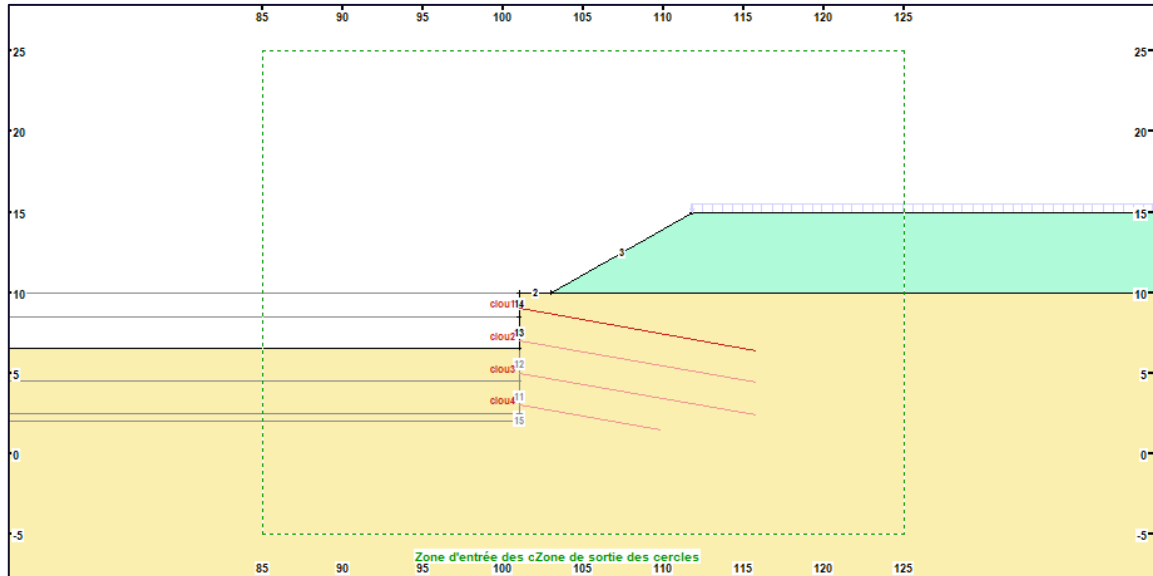


Figure 28 : fenêtre de dessin de GeoStab

Les éléments constituant le modèle peuvent être sélectionné dans la fenêtre graphique. Lors du survol d'un élément celui-ci apparaît en surbrillance rouge.

Nota : un cliqué-glissé avec le bouton droit de la souris permet de déplacer le contenu de la fenêtre graphique.

3. Saisie du modèle

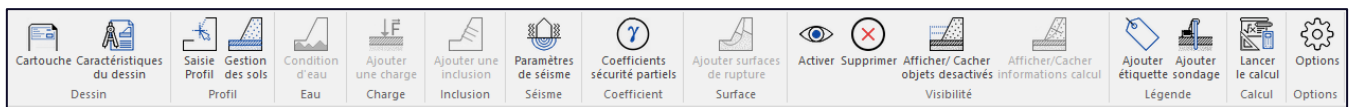
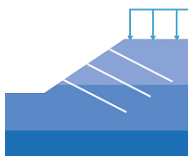


Figure 29 : barre des menus du mode neutre

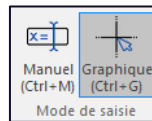
Chaque sous-partie suivante décrit les options de saisies des modules accessibles depuis la barre ci-dessus. Elles seront décrites dans l'ordre (de gauche à droite).

3.1. Comportements génériques de saisie

Certains comportements du logiciel sont communs à plusieurs modules.



3.1.1. Boutons de mode de saisie



Ces boutons permettent :

- **Manuel** : passage en saisie manuelle. La saisie manuelle utilise la fenêtre de **propriétés** (2.1.3) pour renseigner les caractéristiques d'un élément du modèle.
- **Graphique** : passage en saisie graphique. La saisie graphique utilise la fenêtre **graphique** (2.1.5) pour spécifier les caractéristiques d'un élément du modèle.

Ces boutons ont le même effet que les boutons   de la fenêtre de propriété (24).

3.1.2. Boutons de validations



Le sous-menu comprend 2 boutons :

- **Valider phase courante** : permet de valider la modification des propriétés ou la création d'un objet pour la phase courante uniquement. Ce bouton a le même effet que le bouton  de la fenêtre de propriété ;
- **Valider toutes phases** : permet de valider la modification des propriétés ou la création d'un objet pour toutes les phases du modèle. Ce bouton a le même effet que le bouton  de la fenêtre de propriété.

3.1.3. Boutons de navigation



Ces boutons permettent de naviguer entre les différents modules de saisie, ou de fermer le module actif.

L'utilisation d'un de ces boutons après avoir édité des paramètres sans les valider déclenche le message suivant (ici pour la saisie du profil) :

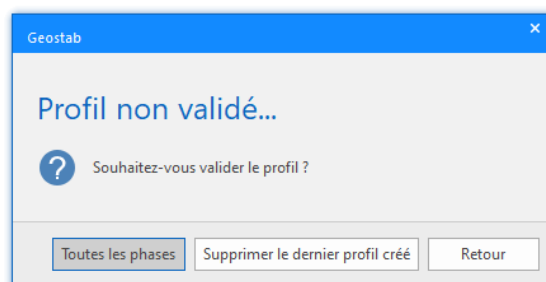
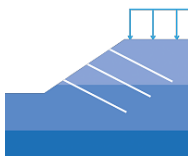
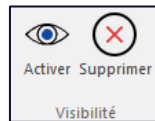


Figure 30 : fenêtre de confirmation lors d'un changement de module de saisie ou de phase/cas



3.1.4. Boutons d'activation et de suppression



Ces boutons permettent :

- **Activer** : permet d'activer ou de désactiver des éléments du profil. L'activation est un mécanisme lié à une phase.

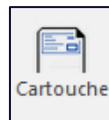
L'activation/désactivation d'élément constitue la base du phasage dans GeoStab. C'est grâce à cet outil que sont réalisés des terrassements, la mise en place des inclusions, de surcharges...

Nota : l'activation étant liée à une phase, il n'est pas possible d'activer/désactiver un même élément de façon distincte dans deux cas de calcul appartenant à une même phase

- **Supprimer** : permet de supprimer la plupart des éléments constituant le profil.

Nota : certains éléments du modèles (les sols par exemples) ne peuvent être supprimés que depuis le module de saisie correspondant.

3.2. Cartouche



La saisie du cartouche se fait à l'aide de la fenêtre ci-dessous :

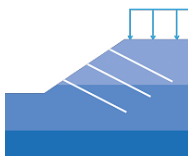
Figure 31 : fenêtre de saisie du cartouche

Elle se compose de plusieurs champs, tous optionnels et n'influençant pas le calcul. Les valeurs sont retrouvées dans le cartouche de la feuille de sortie :

REF_SIGN	13/04/22 16:32	TITRE DU CALCUL (1)	Phase Initiale - Cas Initial	FIGURE
(3) (4)	(2)	COMMENTAIRE 1 COMMENTAIRE 2 COMMENTAIRE 3		1 (5)

GEOSTAB-925271165026748183

Figure 32 : Cartouche de la feuille de sortie



3.3. Caractéristiques du dessin

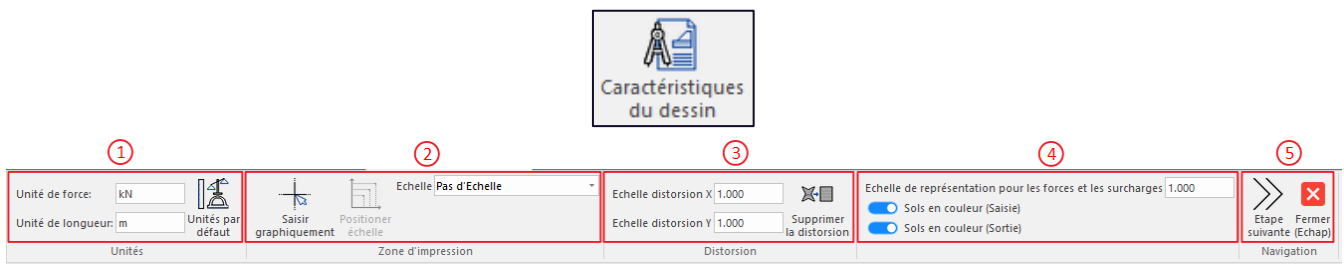


Figure 33 : barre des menus du module de caractéristiques du dessin

- ① **Unités** : permet de définir les unités utilisées dans le modèle

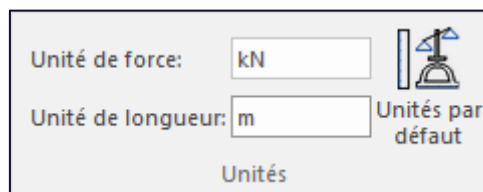


Figure 34 : sous-menu de définition des unités

Rappel : dans GeoStab, les unités sont indicatives. Quel que soit le choix opéré, elles doivent rester homogènes.

- ② **Zone d'impression** : contient des options de configurations pour le cadre de sortie et l'échelle

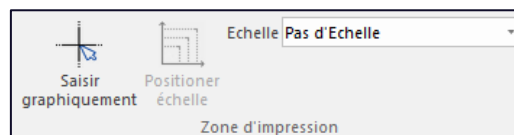


Figure 35 : sous-menu de définition du cadre de sortie

Nota : le calcul effectué par le logiciel, pour chaque phase, est indépendant de la zone d'impression. Celle-ci n'impacte que la visualisation graphique des résultats du calcul.

- ③ **Distorsion** : permet de configurer la distorsion en abscisse et en ordonnée

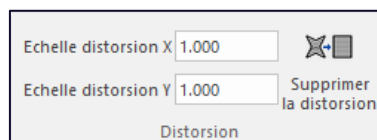


Figure 36 : sous-menu de définition de distorsion

- ④ **Couleurs et échelles des charges** : permet de configurer l'affichage des sols et l'échelle des charges

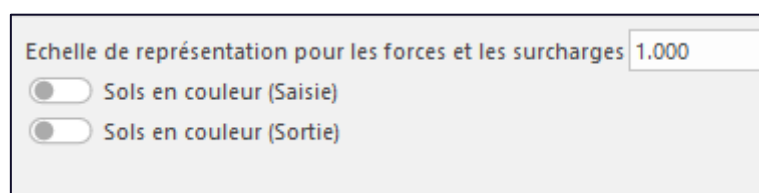
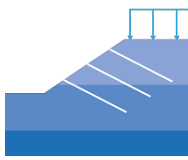
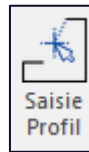


Figure 37 : sous-menu d'option d'affichage des charges et des sols



3.4. Saisie du Profil



La saisie de la géométrie du modèle se fait à l'aide du bouton ci-dessus. Un clic permet d'ouvrir le menu de saisie de la géométrie.

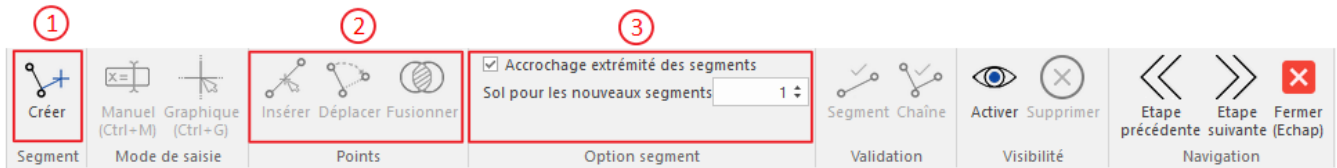


Figure 38 : barre des menus du module de saisie du profil

Par convention, toute la géométrie doit être située dans le premier quadrant ($x \geq 0$; $y \geq 0$), et l'amont doit se situer à droite du profil.

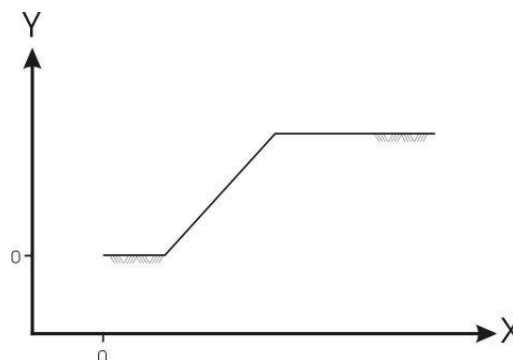
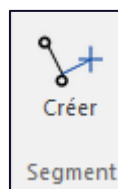


Figure 39 : schéma d'orientation du profil à respecter pour le bon déroulement du calcul

① **Créer** : permet de commencer la saisie de nouveaux segments pour le profil



Il est important de noter que les segments verticaux ne sont pas permis. Lors du tracé d'un segment vertical, la fenêtre suivante apparaît :

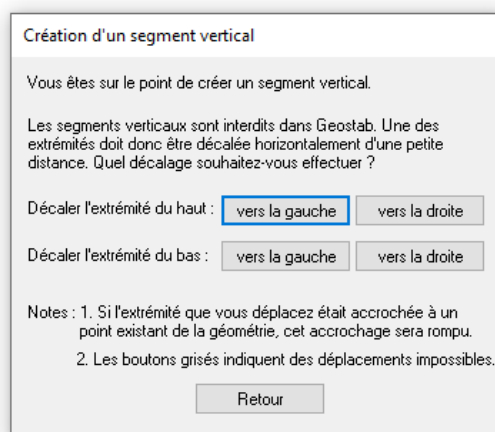
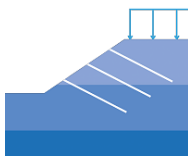


Figure 40 : fenêtre d'avertissement vis-à-vis des segments verticaux

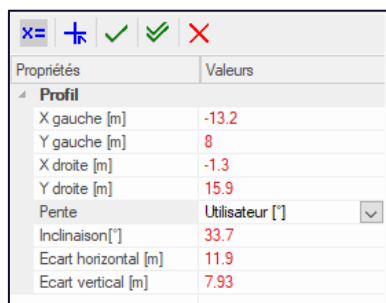
• Saisie graphique

Par défaut, le mode de saisie graphique (Ctrl + G) est actif, identifié par un changement de curseur ().
Chaque clic gauche permet d'ajouter un point au modèle.

Une fois que la chaîne de segments est terminée, il convient de la valider en utilisant le bouton « Chaîne » () du menu de validation de la barre des menus ou le bouton de validation de la fenêtre de propriété ().

• Saisie manuelle

En mode de saisie manuelle, les points sont ajoutés par saisie de leurs coordonnées X et Y depuis la fenêtre de propriétés :



Propriétés	Valeurs
Profil	
X gauche [m]	-13.2
Y gauche [m]	8
X droite [m]	-1.3
Y droite [m]	15.9
Pente	Utilisateur [°] 
Inclinaison [°]	33.7
Ecart horizontal [m]	11.9
Ecart vertical [m]	7.93

Figure 41 : fenêtre de propriété lors de la saisie de segments

Procédure :

1. Création du 1^{er} point de la chaîne de segment en renseignant les valeurs de « X gauche » et « Y gauche » puis validant à l'aide de la touche « Entrée » du clavier
2. Création des points suivants de la chaîne de segment en renseignant les valeurs de « X droite » et « Y droite » puis validant à l'aide de la touche « Entrée » du clavier

Une fois que la chaîne de segments terminée, il convient de la valider en utilisant le bouton « Chaîne » ( , [3.4](#)) du menu de validation de la barre des menus ou le bouton de validation de la fenêtre de propriété ().

② **Points** : regroupe les actions disponibles pour les points

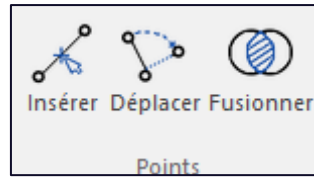
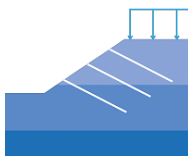


Figure 42 : sous-menu d'opérations sur les points du profil

- **Insérer** : permet d'insérer un point sur un segment existant du profil,
- **Déplacer** : permet de déplacer un point existant du profil,
- **Fusionner** : permet de réunir plusieurs points proches en un seul.

La première étape consiste à sélectionner graphiquement les points à fusionner en traçant une boîte qui contient les points. Les points sont alors identifiés par des croix vertes. Il convient ensuite de sélectionner la position à laquelle rattacher les points sélectionnés

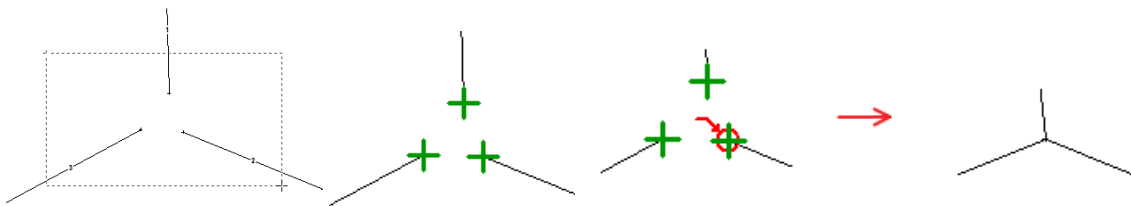
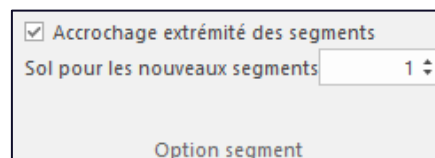
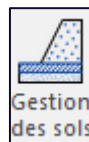


Figure 43 : étapes de la fusion de points

- ③ **Option segment** : permet de choisir le sol associé par défaut aux nouveaux segments et d'activer ou désactiver l'accrochage aux segments existants



3.5. Saisie des sols



La saisie des sols du modèle se fait à l'aide du bouton ci-dessus. Un clic permet d'ouvrir le menu de saisie des sols.

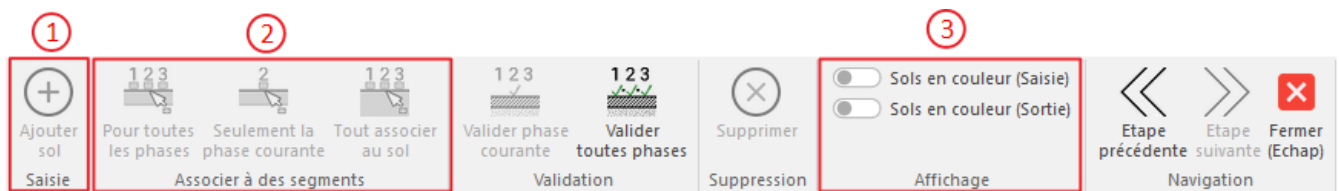
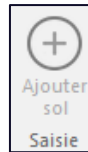
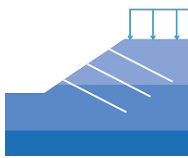


Figure 44 : barre des menus du module de saisie des sols

- ① **Saisie** : permet d'ajouter un sol



Ce bouton permet de créer un nouveau sol et fait apparaître la fenêtre de propriétés (cf paragraphe §3.5.1.1 ci-dessous) permettant la saisie de ses paramètres.

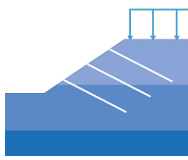
3.5.1. Propriétés des sols

Propriétés	Valeurs
Sol	
Sol n°	2
Nom du sol	
Poids volumique [kN/m³]	0
Poids volumique du sol satur...	0
Cohésion [kPa]	0
Angle de frottement interne [°]	0
Frottement latéral unitaire (sol...	0
Trame	
Couleur	
Hachures n°	1
Option avancée	
Utiliser multicritère	☐ Off
Anisotropie	☐ Off
Cohésion en profondeur	☐ Off
Angle frot./Pression	☐ Off

Figure 45 : fenêtre de propriétés lors de l'ajout d'un sol

Les propriétés des sols sont les suivantes :

- **Sol n°** : indique le numéro du sol en cours de création ou modification (valeur non modifiable),
- **Nom du sol** : permet d'indiquer le nom de la couche de sol
- **Poids volumique** : le poids volumique utilisé pour les sols hors nappe ([kN/m³]).
- **Poids volumique du sol saturé** : poids volumique utilisé pour les sols sous nappe ([kN/m³])
- **Cohésion** : cohésion drainée ou non drainée du sol ([kPa]).
- **Angle de frottement interne** : angle de frottement interne du sol en condition drainées ou non drainée ([°]).
- **Frottement latéral unitaire limite** : frottement sol-inclusion q_s . ([kPa]).
- **Couleur** : couleur d'affichage du sol dans le logiciel :
- **Hachures n°** : hachure d'affichage du sol dans le logiciel.



3.5.1.1. Propriété « Utiliser Multicritère »

- **Utiliser Multicritère** : permet la prise en compte du multicritère. Trois paramètres supplémentaires doivent être renseignés.

Utiliser multicritère	☒ On
Module de réaction d...	0
Pression limite du sol ...	0
Comportement du sol	Traction-cisaillement

Figure 46 : propriétés supplémentaires lors de l'activation du multicritère

- **Module de réaction du sol** : K_f ou K_s . (kN/m^3)
- **Pression limite du sol** : p_i^* (kN/m^2)
- **Comportement du sol** : qui dispose d'une liste déroulante avec 3 options de comportement de sols « Traction-cisaillement », « Traction pure » et « Cisaillement pur ».

Note : l'activation du multicritère peut être effectuée de façon indifférenciée dans les propriétés des sols ou dans les propriétés des inclusions.

3.5.1.2. Propriété « Anisotropie »

Anisotropie : permet d'attribuer un comportement anisotrope à un sol. Activer l'option ajoute un champ comprenant un bouton (...) juste en dessous permettant de définir les valeurs de cohésion et de frottement pour chaque direction.

Anisotropie	☒ On
	Définir les valeurs... (...)

Figure 47 : champ supplémentaire pour définir les valeurs lors de l'activation de l'anisotropie

Cliquer sur le bouton affiche la fenêtre suivante :

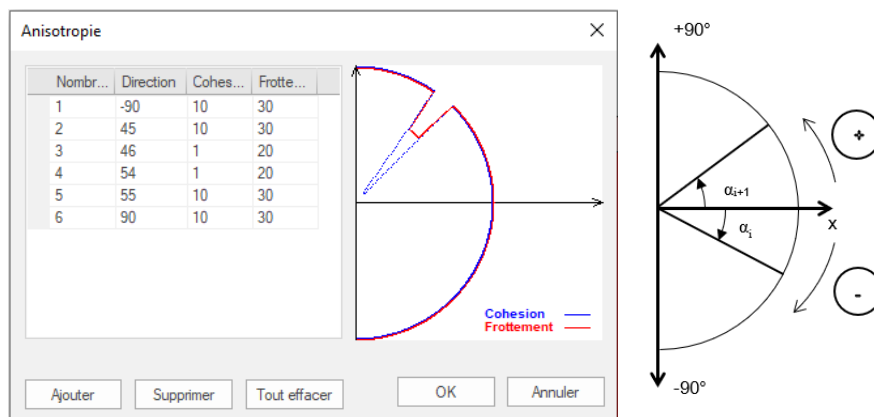
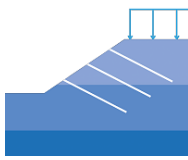


Figure 48 : fenêtre d'anisotropie et diagramme de correspondance

Nota : un sol sera considéré comme anisotrope si au moins 2 directions ont été saisies. Elles doivent être classées par ordre croissant entre -90° (première direction) et 90° (dernière direction).

Nota : le comportement du sol est obtenu par une interpolation linéaire basée sur l'inclinaison de la surface de rupture au point étudié par rapport aux données définies dans l'option anisotropie



Il s'agit d'une modélisation généralement adaptée aux calculs de talus rocheux, où la rupture se produit dans les plans de fissurations (modèle de surfaces de ruptures par surfaces planes).

La figure suivante montre que les résultats des recherches des surfaces de rupture les plus critiques vont se trouver dans le faisceau dans lequel les caractéristiques sont plus faibles, et ce notamment en modélisation de ruptures par plans.

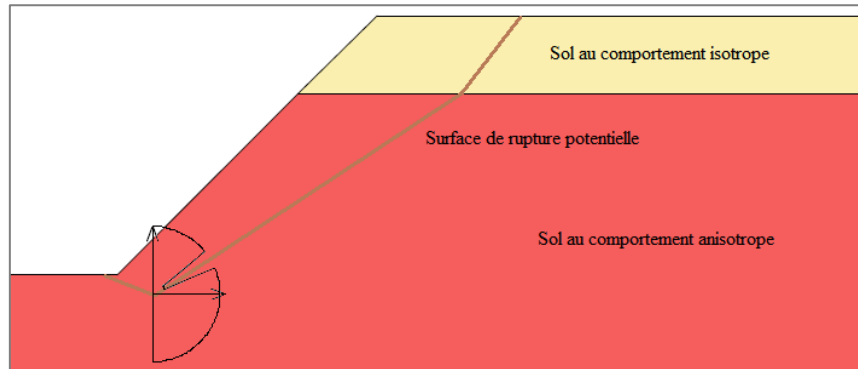


Figure 49 : exemple de surface de rupture générées avec un sol anisotrope

3.5.1.3. Propriété « Cohésion en profondeur »

Cohésion en profondeur : Les calculs courants de stabilité imposent de définir des sols de caractéristiques homogènes. Pourtant, sur le terrain, un même sol peut avoir des caractéristiques variant avec la profondeur. Certaines modélisations, comme la prise en compte de caractéristiques plus faibles à des faibles profondeurs (liée aux cycles de gel / dégel) imposent de prendre en compte une variation de cohésion en fonction de la profondeur.

Activer l'option ajoute un champ comprenant un bouton (...) permettant de définir des valeurs de cohésion et de profondeur. (L'option « **Cohésion en profondeur** » n'est pas compatible avec l'anisotropie, qui sera automatiquement désactivée).



Figure 50 : champ supplémentaire pour définir les valeurs lors de l'activation de l'option « Cohésion en profondeur »

Cliquer sur le bouton affiche la fenêtre suivante :

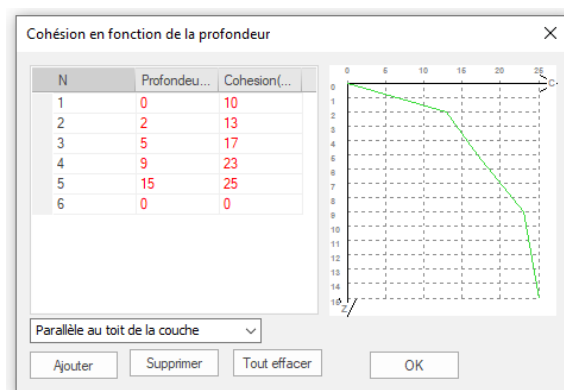
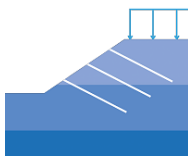


Figure 51 : fenêtre de saisie des valeurs de cohésion en fonction de la profondeur

Les colonnes « Profondeur » et « Cohésion » permettent de définir l'évolution de la cohésion avec la profondeur. Le bouton **Ajouter** permet d'augmenter le nombre de lignes du tableau.



Il est également demandé à l'utilisateur, via un menu déroulant, de définir la convention de mesure de la profondeur :

- **Parallèle au toit de la couche** : la profondeur nulle (0) suit les segments définissant le toit de la couche de sol concernée.
- **Horizontal au sommet de la couche** : la profondeur nulle (0) se situe au niveau du point le plus haut de la couche de sol concernée.

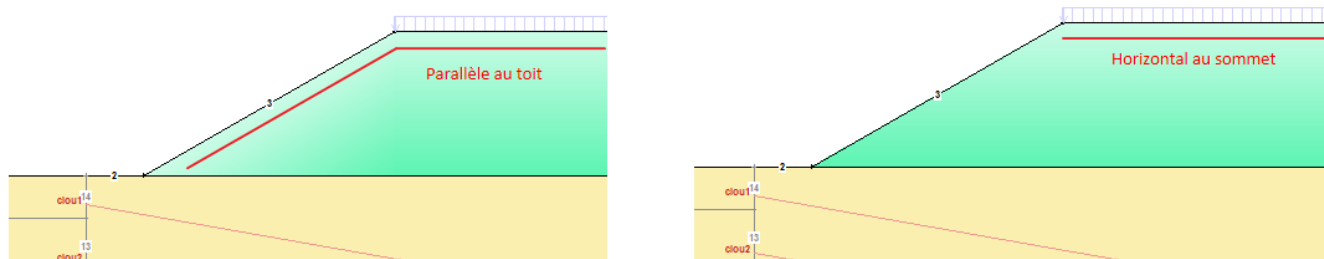


Figure 52 : options de modélisation pour l'évolution de la cohésion en fonction de la profondeur

3.5.1.4. Propriété « Angle frot./Pression »

Pour de faibles épaisseurs de couverture, et notamment pour le calcul des cercles de peau ou pour des sols soumis au cycle gel/dégel, il s'avère que l'angle de frottement interne à faible contrainte est supérieur à l'angle de frottement déterminé classiquement (critère théorique de Mohr-Coulomb).

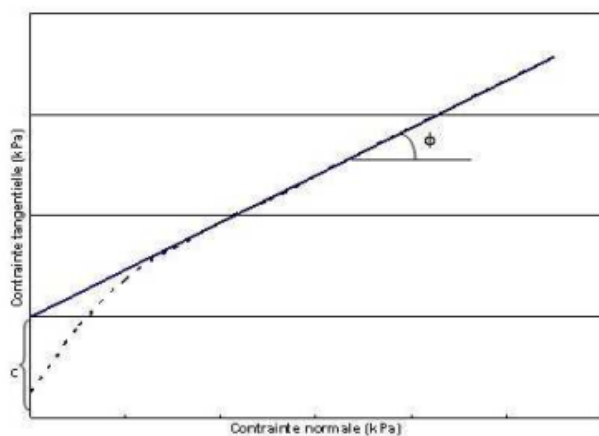


Figure 53: critère théorique de Mohr-Coulomb

Cette option permet de faire varier la valeur de l'angle de frottement en fonction de la pression verticale. Activer l'option ajoute un champ comprenant un bouton (...) juste en dessous permettant de définir des valeurs d'angle de frottement et de pression. (L'option « **Angle frot./Pression** » n'est pas compatible avec l'anisotropie, qui sera automatiquement désactivée).

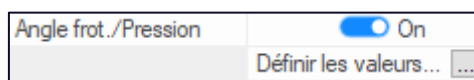
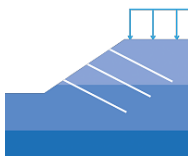


Figure 54 : champ supplémentaire pour définir les valeurs lors de l'activation de l'option « Angle frot./Pression »



Cliquer sur le bouton affiche la fenêtre suivante :

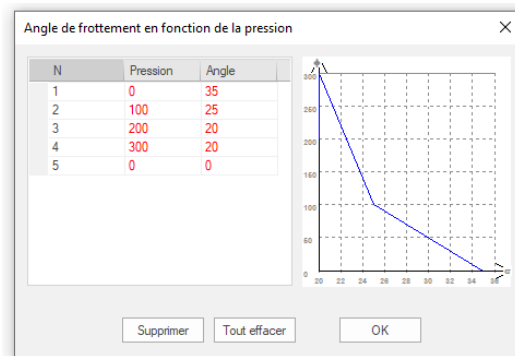


Figure 55 : fenêtre de saisie des valeurs de frottement en fonction de la pression

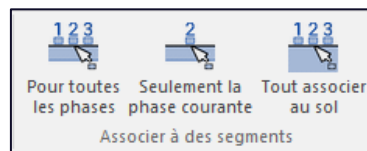
3.5.2. Association de sols à des segments du profil

② **Associer à des segments** : regroupe les boutons d'association de sols à des segments

Afin que ces boutons soient disponibles, il convient de sélectionner un sol préalablement créé :

- Par un clic sur un sol dans la liste récapitulative des données du module de saisie des sols
- Par un clic sur un sol déjà associé à un segment, dans la fenêtre graphique

Le sol sélectionné peut être associé à des segments à l'aide des 3 options décrites ci-dessous :



- **Pour toutes les phases** : associe le sol à un segment pour toutes les phases de calcul.
- **Seulement la phase courante** : associe le sol à une segment pour la phase courante.
- **Tout associer au sol** : associe le sol à tous les segments du modèle pour la phase courante et les phases suivantes.

Lorsque l'association d'un sol à un segment est active, le curseur prend l'apparence d'un pinceau (). Un clic gauche sur un segment permet d'associer le sol à ce dernier.

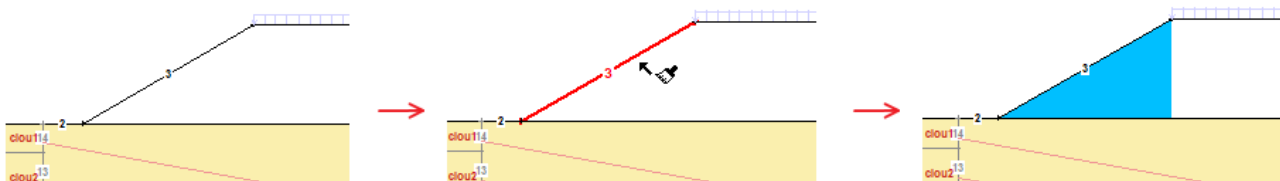
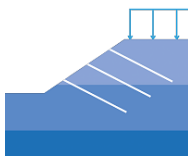


Figure 56: procédure d'association d'un sol à un segment

Note : après association d'un sol à un segment GeoStab 5 considère que tout l'espace situé verticalement sous ce segment est constitué du sol associé, jusqu'à une profondeur « infinie » ou jusqu'à la rencontre d'un autre segment



3.5.3. Visualisation des sols

③ **Affichage** : comprend les options d'affichages des sols

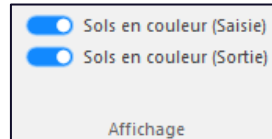


Figure 57 : sous menu d'option d'affichage en saisie et en sortie pour les sols

3.6. Condition d'eau



La saisie des conditions d'eau du modèle se fait à l'aide du bouton ci-dessus. Un clic permet d'ouvrir le menu de saisie des conditions d'eau.

Nota : le modèle doit comprendre au moins un segment pour permettre l'accès à la saisie des conditions d'eau.

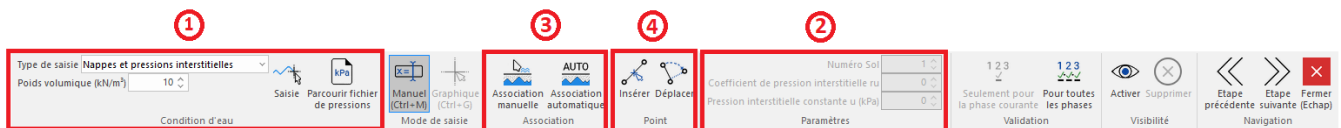


Figure 58 : Barre des menus de la saisie des conditions d'eau

3.6.1. Type de saisie des conditions d'eau

① **Condition d'eau** : permet de choisir comment sont renseignées les conditions d'eau du modèle

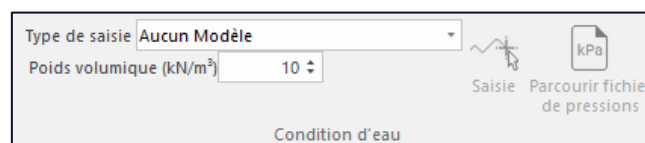


Figure 59 : sous-menu de saisie des conditions d'eau

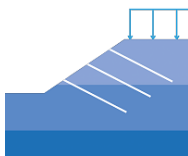
Le sous-menu se compose des options suivantes :

- **Type de saisie** : permet de choisir le mode de saisie des conditions d'eau. Par défaut, la valeur est fixée sur « Aucun Modèle » :

Aucun Modèle
Nappe définie par des points
Paramètres de pressions interstitielles
Pressions interstitielles constantes
Nappes et pressions interstitielles

Figure 60 : menu déroulant des types de saisie des conditions d'eau

- **Aucun Modèle** : pas de conditions d'eau
- **Nappe définie par des points** : permet de définir une nappe par des points.



- **Paramètres de pressions interstitielles** : permet de définir des valeurs de pressions interstitielles à différentes positions (X ;Y) du modèle.
 - **Pressions interstitielles constantes** : permet de définir des valeurs pressions interstitielles constantes au sein des sols.
 - **Nappes et pressions interstitielles** : permet de renseigner une combinaison de nappes définies par des points et de valeurs de pressions interstitielles.
- **Poids volumique** : poids volumique pour l'eau ([kN/m³]). Par défaut, la valeur est fixée à 10 kN/m³.

3.6.1.1. Ajouter une nappe définie par des points

La saisie s'effectue de la même façon que pour la création de segments (§3.2) à deux exceptions près :

- La nappe doit couvrir toute la largeur du modèle : ses points d'extrémité gauche et droite doivent respectivement présenter une abscisse égale à l'abscisse minimale et maximale des éléments existant dans la géométrie du modèle.
- Les deux premiers points créés doivent constituer les extrémités gauche et droite de la nappe.

3.6.1.2. Pressions interstitielles

3.6.1.2.1. Saisie via un fichier de pression interstitielles

Il est possible d'importer dans GeoStab un fichier prédéfini contenant les valeurs de pression interstitielle à prendre en compte.

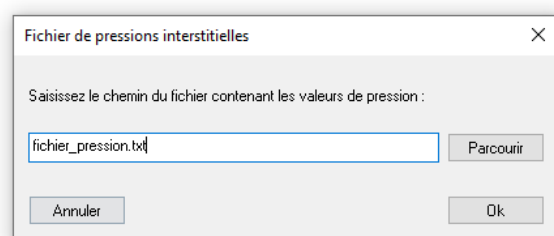


Figure 61 : fenêtre de renseignement du fichier de pression

Le fichier importé doit être au format « *.txt », et être organisé comme indiqué ci-dessous :

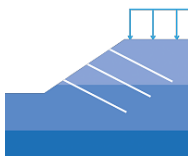
nombre de points → 10

x	y	pression
0.	0.	100.
5.	0.	100.
10.	0.	100.
15.	0.	100.
0.	1.	90.
5.	1.	90.
10.	1.	90.
15.	1.	90.
0.	2.	80.
5.	2.	80.

←←←←←
tabulations

Figure 62 : exemple d'un fichier d'import de pressions interstitielles

La pression interstitielle à la base de chaque tranche est calculée par interpolation à partir des points les plus proches et de l'isobare $u = 0$. La pression calculée sera d'autant plus précise que le maillage sera resserré.



3.6.1.2.2. Saisie directe des pressions interstitielles

② **Paramètres** : permet de renseigner des valeurs de pressions interstitielles

Numéro Sol	1
Pression interstitielle ru (kPa)	0
Pression interstitielle constant u (kPa)	0
Paramètres	

Figure 63 : sous-menu de saisie des pressions interstitielles

Afin d'avoir accès à une partie de ces options, il faut que le type de saisie soit « **Paramètres de pressions interstitielles** » ou « **Pressions interstitielles constantes** » et qu'au moins 1 sol ait été renseigné.

Le sous-menu se compose de 3 options :

- **Numéro Sol** : numéro du sol auquel les paramètres de pression interstitielle sont appliqués.
- **Pression interstitielle ru** : modifiable pour le type de saisie « **Paramètres de pressions interstitielles** ». Permet de renseigner le coefficient de pression interstitielle ru (sans unité). GeoStab calcule la valeur de la pression interstitielle tel que :

$$u = \sigma_v * r_u$$

- **Pression interstitielle constante u** : permet de renseigner une valeur de pression interstitielle constante en ([kPa]) pour le sol sélectionné dans le champ « Numéro Sol ».

3.6.2. Association d'une nappe à un sol

③ **Association** : permet d'associer une nappe à un sol

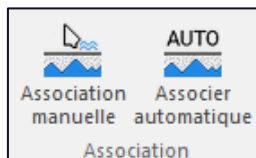


Figure 64 : sous-menu d'association d'une nappe à un sol

Pour que les boutons soient disponibles, il faut au préalable avoir défini une nappe par des points et l'avoir sélectionné en cliquant dessus à l'aide du clic gauche de la souris. Une nappe sélectionnée prend l'aspect d'un trait bleu continu :

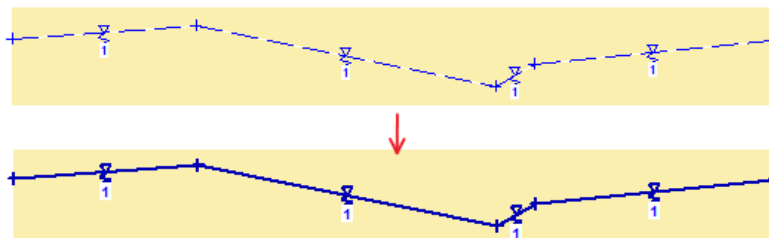
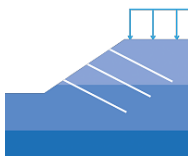


Figure 65 : aspect d'une nappe sélectionnée

Lorsque l'association d'une nappe à un sol est active, le curseur change d'apparence (). Un clic gauche sur une trame de sol permet d'associer la nappe à ce dernier.

Lorsqu'une nappe a été associée à un sol, le numéro de sol apparaît dans la liste récapitulative, dans la colonne « **Sol associé** ».



L'**association automatique** associe automatiquement tous les sols situés sous la nappe sélectionnée à cette dernière.

Nota : cette opération est essentielle dans le cas d'une ou plusieurs nappes définies par des points. Si les nappes concernées ne sont pas associées à des sols, leur impact sur le calcul n'est pas pris en compte.

3.6.3. Gestion des points d'une nappe

④ **Point** : regroupant les actions disponibles pour les points d'une nappe

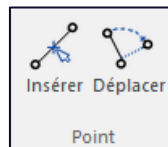


Figure 66 : sous-menu d'opérations sur les points d'une nappe

3.7. Ajouter une charge

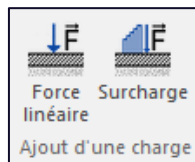


L'ajout de charge au modèle se fait à l'aide du bouton ci-dessus. Un clic permet d'ouvrir le menu de saisie des charges.



Figure 67 : barre de menus du module de saisie des charges

① **Ajout d'une charge** : permet de débiter l'ajout d'une force ou d'une surcharge (force répartie).

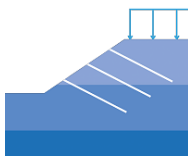


Le sous-menu se compose de 2 boutons :

- « **Force linéaire** » : permet d'ajouter une force linéaire au modèle.

Lorsque ce mode de saisie est actif, le curseur change d'apparence ($\downarrow F$). L'ajout d'une force en mode graphique comporte 3 étapes :

- Position de la force : elle doit impérativement être rattachée à un segment, puis validée par un clic gauche.
- Intensité de la force : après avoir choisi la position d'application de la force, le mouvement du curseur permet de choisir l'intensité de la force en modifiant graphiquement la longueur de la flèche la représentant.



- Inclinaison de la force : après avoir défini l'intensité de la force, le mouvement du curseur permet de faire varier l'inclinaison de la force en modifiant graphiquement l'orientation de la force par rotation autour d'un axe situé au niveau du point d'application.

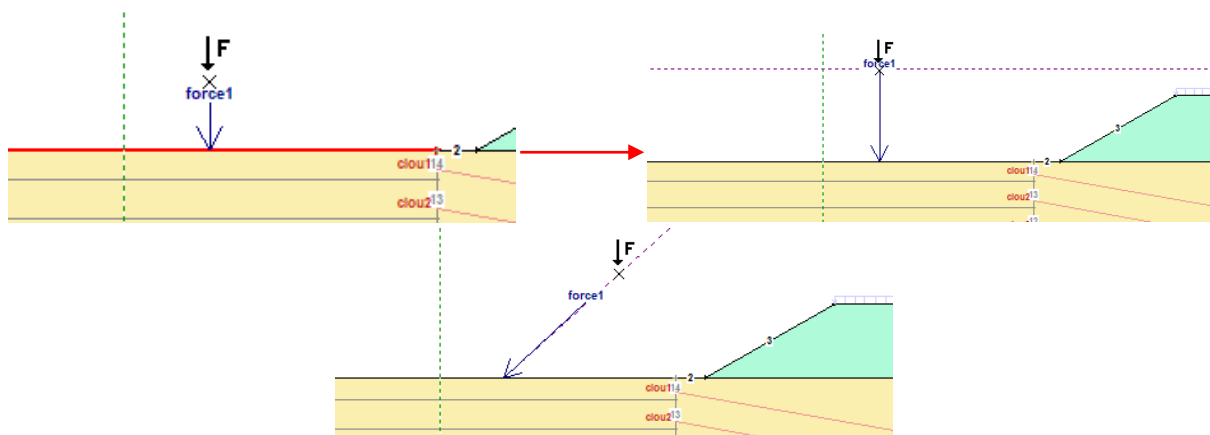


Figure 68 : création graphique d'une force linéaire

Les valeurs définies graphiquement peuvent être retrouvées dans la fenêtre des propriétés.

Une force linéaire peut également être définie manuellement directement depuis la fenêtre des propriétés.

- « **Surcharge** » : permet d'ajouter une surcharge au modèle.

Lorsque ce mode de saisie est actif, le curseur change d'apparence (). L'ajout d'une surcharge en mode graphique comporte 5 étapes :

- Position des extrémités de la surcharge : elles doivent impérativement être rattachée à un segment du terrain naturel, puis validée par un clic gauche.
- Valeur de la contrainte aux extrémités : après avoir choisi la position des extrémités de la surcharge, le mouvement du curseur permet de choisir la valeur de la contrainte aux extrémités en modifiant graphiquement la hauteur de la surcharge.
- Inclinaison de la surcharge : après avoir défini la valeur de la contrainte aux extrémités, le mouvement du curseur permet de faire varier l'inclinaison de la surcharge en modifiant graphiquement l'orientation de la surcharge par rotation.

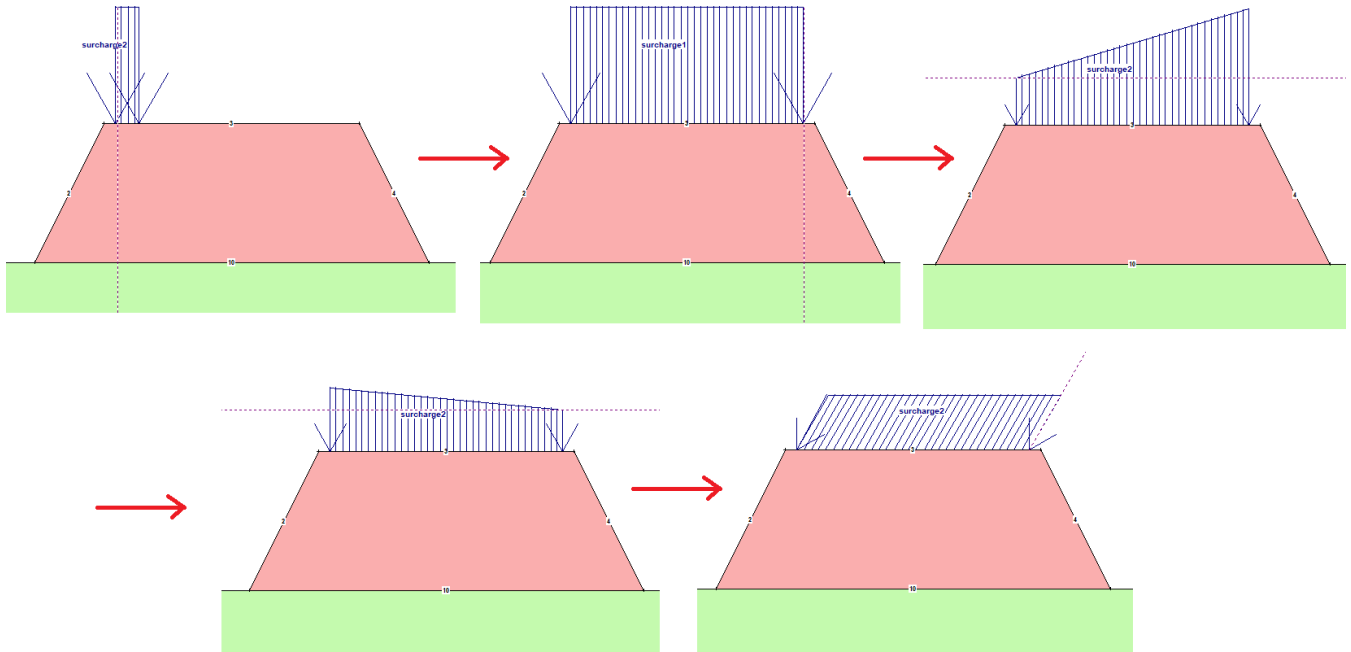
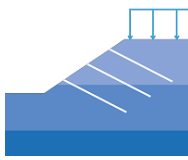
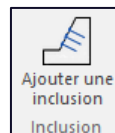


Figure 69 : création graphique d'une surcharge

Les valeurs définies graphiquement peuvent être retrouvées dans la fenêtre des propriétés.
Une surcharge peut également être définie manuellement directement depuis la fenêtre des propriétés.

3.8. Ajouter une inclusion

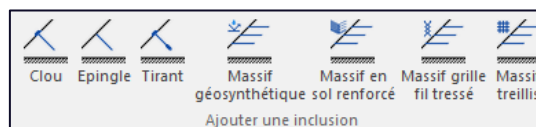


L'ajout d'inclusions au modèle se fait à l'aide du bouton ci-dessus. Un clic permet d'ouvrir le menu de saisie des inclusions.

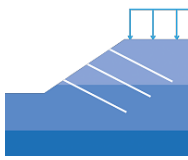


Figure 70 : barre des menus du module de saisie des inclusions

1 Ajouter une inclusion : regroupe les différents types d'inclusion



Au total, 7 types d'inclusions peuvent être renseignés.



3.8.1. Ajouter un clou

Clou : permet d'ajouter un clou au modèle. La construction graphique d'un clou comporte 3 étapes :

- Position de la tête du clou : elle doit impérativement être rattachée à un segment, puis validée par un clic gauche.

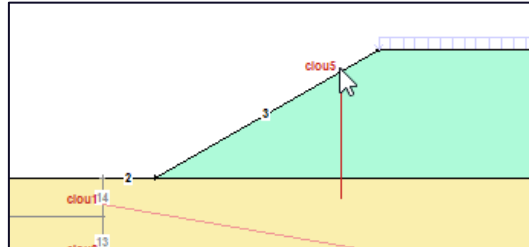


Figure 71 : choix de la position du clou en mode graphique

- Longueur du clou : après avoir choisi la position de la tête du clou, le mouvement du curseur permet de choisir sa longueur en modifiant graphiquement la longueur du segment le représentant.

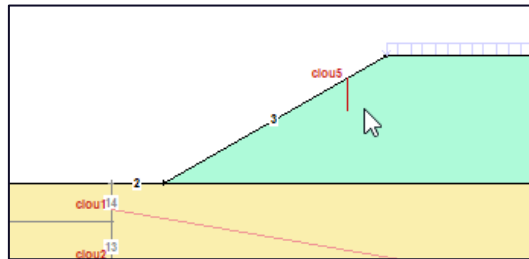


Figure 72 : choix de la longueur du clou en mode graphique

- Inclinaison du clou : après avoir défini la longueur du clou, le mouvement du curseur permet de faire varier l'inclinaison de ce dernier en modifiant graphiquement l'orientation du clou par rotation autour d'un axe situé au niveau de la position de sa tête.

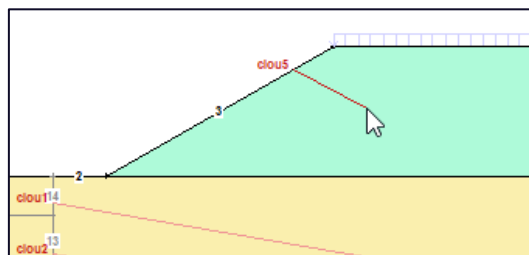


Figure 73 : définition de l'inclinaison du clou en mode graphique

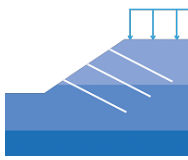
Avant de pouvoir valider la valeur d'angle à l'aide d'un clic gauche, il est nécessaire de renseigner 3 paramètres dans la fenêtre de propriétés : « **Espacement horizontal entre les inclusions** », « **Diamètre du forage** » et « **Traction limite** ».

Note : la traction limite est homogène à une force et définie telle que $T_{lim} = f_y * \varnothing_{clou}$

Les valeurs définies graphiquement peuvent être retrouvées dans la fenêtre des propriétés.

Un clou peut également être défini manuellement depuis la fenêtre des propriétés.

Nota : l'inclinaison d'un clou est mesurée par rapport à l'horizontale et est positive dans le sens horaire. Elle peut être comprise entre 0 et 90°.



Il est important de noter que suivant l'angle α que forme le clou avec la tangente à la surface de rupture, il travaillera en traction ou en compression :

- Si $\alpha < 90^\circ$ le clou travaille en traction.
- Si $\alpha > 90^\circ$ le clou travaille en compression.

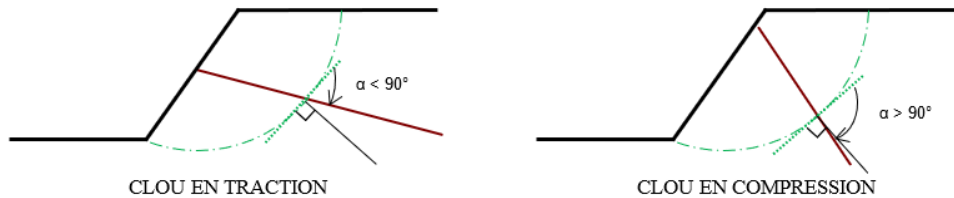


Figure 74 : comparaison d'un clou fonctionnant en traction et en compression

3.8.1.1. Propriété « Utiliser le multicritère »

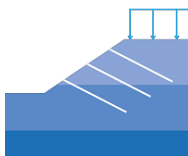
- **Utiliser le multicritère** : Le multicritère permet de prendre en compte les efforts de cisaillement dans les inclusions. Activer l'option ajoute des propriétés à la liste :

Options avancées	
Utiliser multicritère	☒ On
N° Sol	1.
Module de réaction du sol	0
Pression limite du sol	0
Comportement du sol	Traction-cisaillement
Module d'Young acier * inertie de l'armature	0.1
Moment limite de l'armature	0.1
Calculer efforts Tmax, T0	☐ Off
Calculer la longueur Optimum des clous	☐ Off

Figure 75 : propriétés supplémentaires liées à l'activation du multicritère

- **N° Sol** : permet de spécifier le numéro de sol auquel seront associés les 3 propriétés « **Module de réaction du sol** », « **Pression limite du sol** », « **Comportement du sol** ».
- **Module de réaction du sol** : valeur du module de réaction K_f ou K_s ([kPa]).
- **Pression limite du sol** : valeur de la pression limite p_i^* du sol ([kPa]).
- **Comportement du sol** : type de **comportement** parmi celle de la liste déroulante : « **Traction pure** », « **Cisaillement pur** » ou « **Traction-cisaillement** ».
- **Module d'Young acier * inertie de l'armature** : valeur du produit d'inertie EI ([kN.m²]).
- **Moment limite de l'armature** : valeur du moment limite de l'armature $W_{el} \cdot \sigma_e$ correspondant au moment nécessaire pour que l'armature atteigne sa limite élastique en flexion pure. (W_{el} correspondant au module de flexion élastique) ([kN.m]).

Nota : un clou qui travaille en compression verra sa contribution à la stabilité négligée si le multicritère n'est pas activé. Lorsqu'il est actif, la résistance au cisaillement de l'inclusion est égale à sa traction limite divisée par 2. L'approche modélisée dans GeoStab est celle proposée par Blondeau, Christiansen, Guilloux et Schlosser (1984) qui a été remise en cause notamment par Bridle (1989), Jewell & Predley (1990) et Bridle (1990).



3.8.1.2. Propriété « Calculer effort Tmax, T0 »

Calculer effort Tmax, T0 : lorsque cette option est activée, le logiciel calcule les efforts maximums dans les clous et au parement. Cette option nécessite la saisie de paramètre supplémentaires :

Options avancées	
Utiliser multicritère	☐ Off
Calculer efforts Tmax, T0	☒ On
Haut et Bas du parement	Définir graphiquement... ...
Calculer diagramme Culmann	☐ Off
Calculer la longueur Optimum...	☐ Off
Facteur sécurité visé	1
Phase de mise en place du clou	
Phase de mise en place	Phase active
Cas de la phase de mise en ...	Cas actif

Figure 76 : propriétés supplémentaires liées à l'activation du calcul des efforts pour les clous

- **Haut et Bas du parement** : fait apparaître un bouton () permettant de définir le parement dans la fenêtre suivante :

Configuration du Calcul ...

1 : Cliquez sur le point représentant la base du parement

2 : Cliquez sur le point représentant le haut du parement

3 : Choisissez les paramètres du calcul

Poids volumique du béton :

Epaisseur du parement :

Coefficient appliqué à la poussée :

Coefficient d'inclinaison poussée δ/p :

Diagramme de poussée

Point inflexion haut (I1) :

Point inflexion bas (I2) :

Les valeurs de I1 et I2 doivent être comprises entre 0 et 5.5



Figure 77 : fenêtre de définition du parement

Lorsque ce mode de saisie est actif, le curseur change d'apparence () . Les étapes de saisie sont indiquées en bleu dans la fenêtre.

Il convient alors de désigner le point bas et le point haut du parement par un clic gauche sur leur position dans la fenêtre graphique.

Note : le parement doit impérativement disposer d'un point d'intersection avec la tête du ou des clous concernés.

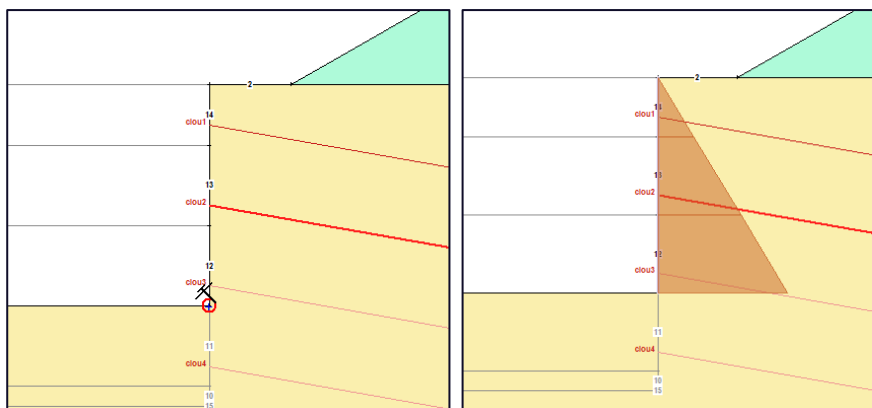
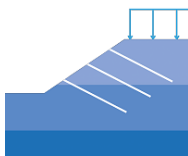


Figure 78 : définition du parement

Une fois la position du parement définie, le diagramme de poussée apparaît dans la fenêtre graphique et dans la fenêtre de définition du parement.

Les champs de la fenêtre deviennent éditables :

- « **Poids volumique du béton** » [kg/m^3]
 - « **Epaisseur du parement** » [m]
 - « **Coefficient appliqué à la poussée** », qui est fonction du rapport entre le déplacement attendu de la paroi et le déplacement nécessaire pour mobiliser la poussée active
 - « **Coefficient d'inclinaison de la poussée** (δ/ϕ) »
- **Calculer diagramme Culmann** : active le calcul du diagramme de Culmann représentant les efforts de poussée s'exerçant sur le parement. Cette option est susceptible d'augmenter le temps de calcul.

Nota : la norme française NF P94-270 – Annexe E précise que la valeur de calcul de l'effort au parement $T_{0,d}$ correspondant à un lit de renforcement est déterminée lors de la phase d'activation de ce lit. GeoStab 5 effectue le calcul de T_0 de cette manière sauf lorsque l'option « Afficher T_0 issu de la surface de rupture de la phase courante » est active, auquel cas le calcul de T_0 est mené une nouvelle fois pour la configuration de la phase courante.

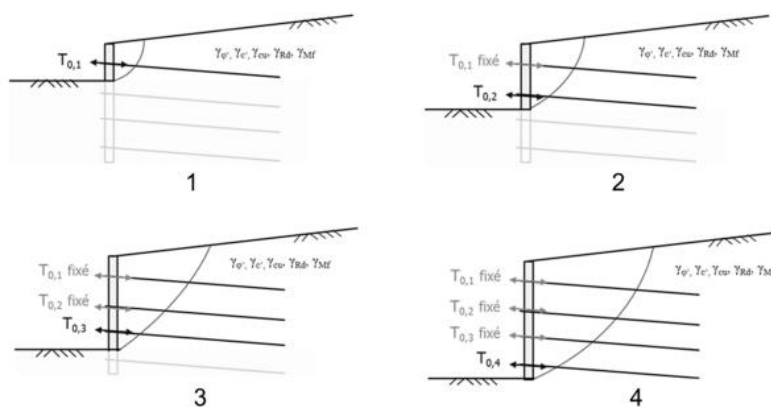
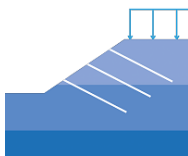


Figure 79: méthodologie de calcul de $T_{0,d}$ suivant la NF P94-270

- **Cas de la phase de mise en place** : champ constitué d'une liste des cas de la phase sélectionnée dans l'option précédente. Cette option permet d'indiquer au logiciel le cas à considérer afin de fixer la valeur de T_0 .



Il est important de noter que les efforts induits sont des efforts de traction, et que le clou doit donc fonctionner en traction afin que les efforts calculés ne soient pas nuls. De plus, les clous doivent intercepter des cercles de ruptures afin d'avoir un impact sur la stabilité de l'ouvrage et donc reprendre des efforts.

3.8.1.3. Propriété « Calculer la longueur optimum des clous »

- **Calculer la longueur optimum des clous** : permet de calculer la longueur minimale des clous de chaque lit afin d'obtenir un facteur de sécurité visé.

Calculer la longueur Optimum...	☒ On
Facteur sécurité visé	1
Longueur minimum en [m]	5

Figure 80 : propriétés supplémentaires liées à l'action du calcul de longueur optimum des clous

- **Facteur de sécurité visé** : permet de renseigner le facteur de sécurité visé pour le calcul d'optimisation de longueur de clou. La valeur du facteur de sécurité visé est la même que celle définie pour le calcul des efforts au parement (cf paragraphe §3.8.1.2).
- **Longueur minimum** : permet de renseigner la longueur minimum des clous. La longueur maximum est égale à la longueur du clou considéré renseignée dans la fenêtre de propriétés.

La sauvegarde des paramètres d'un clou s'effectue pour la phase active (✓) ou pour toute les phases (✓✓) depuis les boutons de la fenêtre de propriétés (2.2.4.2).

3.8.2. Ajouter une épingle

Épingle : permet d'ajouter une épingle. Une épingle diffère d'un clou sous GeoStab par le fait qu'elle est libre en tête :

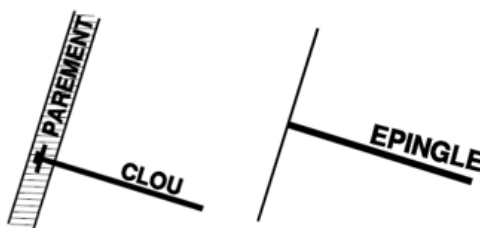
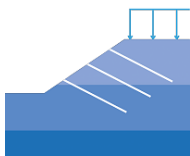


Figure 81 : différence entre un clou et une épingle dans GeoStab

La procédure d'ajout d'une épingle est la même que celle du clou et regroupe les mêmes propriétés. Se référer aux points précédents pour les informations concernant l'ajout d'une épingle (3.8.1).



3.8.3. Ajouter un tirant

3.8.3.1. Saisie graphique d'un tirant

Tirant : permet d'ajouter un tirant. Par défaut, l'ajout du tirant débute en mode graphique.

La procédure d'ajout d'un tirant est la même que celle du clou et regroupe les mêmes propriétés. Se référer aux points précédents pour les informations concernant l'ajout d'une épingle ([3.8.1](#)).

En plus des données géométriques associées au tirant, il convient également de renseigner, via la fenêtre de propriétés, la valeur des paramètres suivants :

- **Longueur scellée du tirant** : [m], représente la longueur du tirant qui est scellée dans le béton.
- **Espacement horizontale entre les inclusions** : [m], permet de renseigner l'espacement qui représente la distance entre les tirants dans l'axe perpendiculaire au plan du profil
- **Tension de précontrainte** : [kN], permet de renseigner la contrainte appliquée au tirant lors de sa mise en place.
- **Répartition de l'effort de précontrainte** : permet de choisir la façon dont est réparti l'effort de précontrainte du tirant parmi 4 options :

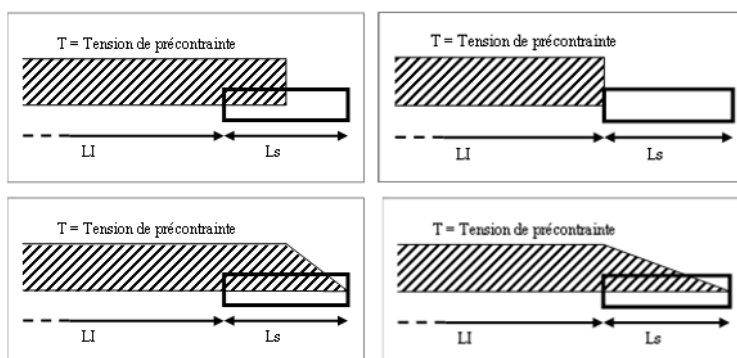
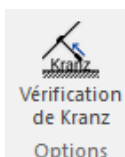


Figure 82 : représentation des différentes options de tension de précontrainte

La sauvegarde des paramètres d'un tirant s'effectue pour la phase active (✓) ou pour toute les phases (✓✓) depuis les boutons de la fenêtre de propriétés ([2.2.4.2](#)).

3.8.3.2. Vérification de Kranz : méthode de vérification des écrans tirantés



GeoStab permet d'effectuer la vérification de la longueur des tirants, en accord avec les recommandations de l'Eurocode 7 selon la méthode de Kranz (cf. NF P 94-282). Utiliser cette option fait apparaître la fenêtre suivante :

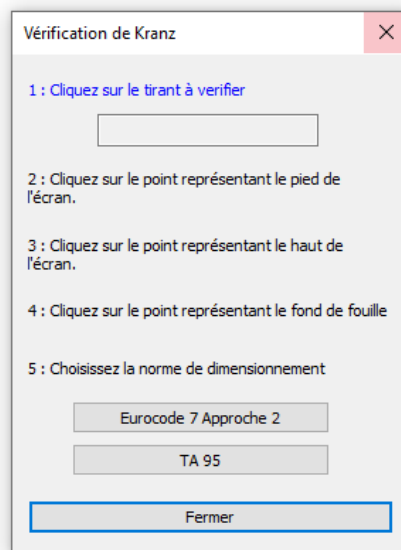
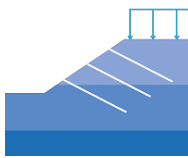


Figure 83 : fenêtre de la procédure de la vérification de Kranz

Les étapes à suivre sont les suivantes :

- Sélectionner le tirant à vérifier vis-à-vis du renversement en cliquant sur ce dernier dans la fenêtre graphique
- Définir les positions du pied et de la tête de l'écran, ainsi que du fond de fouille, par des clics sur les points correspondant dans la zone graphique.

Note : le point désignant le fond de fouille peut être le même que le point bas de l'écran.

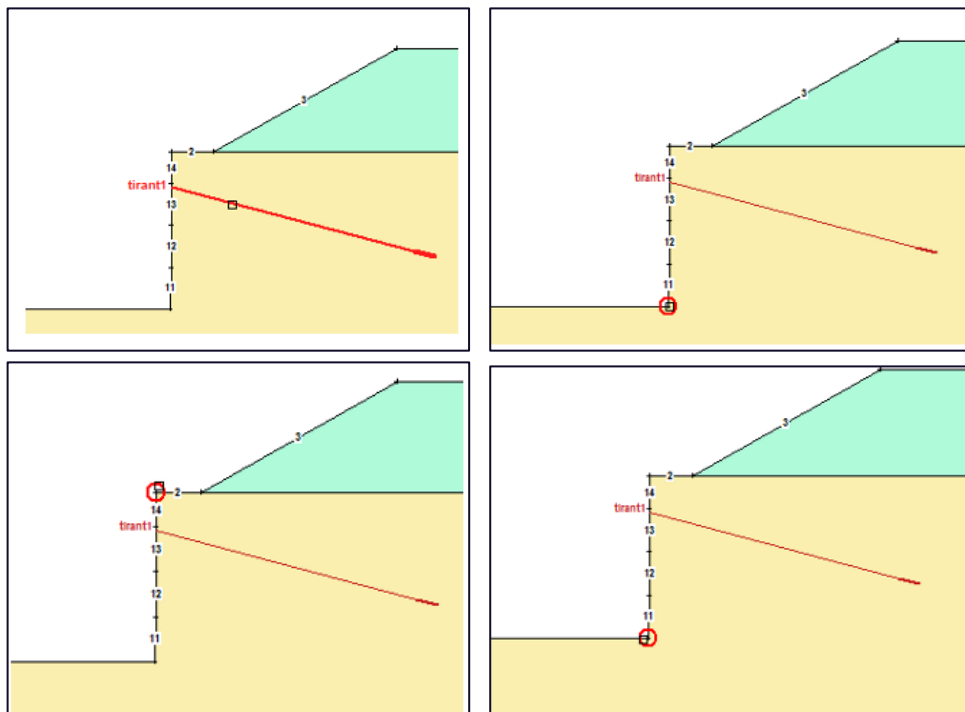
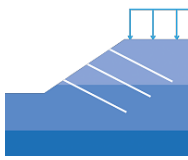


Figure 84 : procédure de définition de la vérification de Kranz

- La dernière étape consiste à choisir la norme de dimensionnement : **Eurocode 7 (approche 2)** ou **TA 95**

Une nouvelle phase nommée « **Vérif. Kranz** » est automatiquement ajoutée au modèle. Dans cette phase, la géométrie du modèle est modifiée pour correspondre à celle du bloc associé au tirant et le sol situé en amont est



désactivé et remplacé par la poussée active qu'il impose au bloc. Les tirants sont remplacés par des forces ponctuelles.

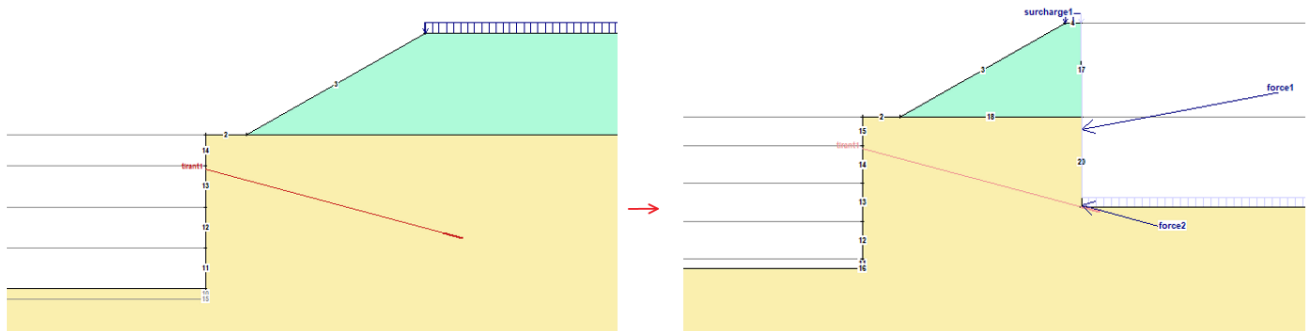


Figure 85 : comparaison de la phase qui a servi de modèle (à gauche) et de la phase créée pour la vérification de Kranz (à droite)

La procédure présentée ci-dessus conduit à l'apparition d'une nouvelle fenêtre (voir ci-dessous) permettant la définition du modèle de surfaces de rupture pour la vérification de Kranz.

Cette fenêtre permet de générer des surfaces de rupture logarithmiques concaves passant par des zones aval, définies suivant l'axe Y et qui doit théoriquement correspondre au point d'effort tranchant nul ; ce point étant inconnu par GeoStab, une recherche est effectuée en parcourant tous les points de l'écran compris entre la base de la fiche et le fond de fouille, et amont (définie par le point d'application de la force représentant le tirant).

Figure 86 : fenêtre de définition des surfaces de ruptures pour la vérification de Kranz

- **Zone d'entrée (aval)** : Les champs peuvent être édités pour modifier la zone d'aval de génération des surfaces. Le bouton « **Modifier graphiquement** » permet de définir la zone d'entrée des surfaces de ruptures graphiquement. Il convient de définir la position de deux points sur l'écran, définis par leur ordonnée, et correspondant à la zone par laquelle peuvent émerger des surfaces de rupture à l'aval.



Figure 87 : définition graphique du second point de la zone d'entrée des surfaces de rupture pour la vérification de Kranz

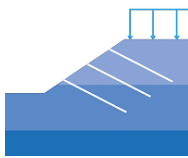
Point de sortie (amont) : Les champs représentent l'abscisse et l'ordonnée du point de sortie des surfaces de ruptures. Vous pouvez choisir d'utiliser le bouton « **Choisir graphiquement** » pour sélectionner graphiquement un point du profil.

Figure 88 : choix graphique du point de sortie des surfaces de ruptures pour la vérification de Kranz

- **Points de l'écran** : les points haut et bas de l'écran déjà définis lors de la construction de la phase de vérification de Kranz peuvent être modifiés ici
- **N° Force représentant le tirant** : permet de désigner la force ponctuelle représentant le tirant dans la phase de vérification de Kranz.

Figure 89 : choix de la force représentant le tirant en mode graphique pour la vérification de Kranz

- **Options de calcul :**
 - **Nombre de points de départ dans la zone aval :** permet de configurer le nombre de point de départ de surface de rupture dans la zone aval.
 - **Nombre de spirales pour chaque point de départ :** permet de configurer le nombre de spirales générées à partir de chaque point de la zone d'aval.
 - **Nombre de subdivisions de l'intervalle d'entrée :** permet de choisir le nombre de subdivisions de l'intervalle d'entrée.



- **Précision sur l'itération du facteur de sécurité** : permet de choisir le pas d'itération du facteur de sécurité lors du calcul.
- **Sens de la spirale** : permet de choisir le sens des spirales générées par le logiciel : « positif (courbé à l'aval) » ou « négatif (courbé à l'amont) ».

Une fois toutes ces données renseignées, le bouton **Ok** permet de les valider. Le calcul peut être lancé et est itératif jusqu'à atteindre l'état limite de stabilité au glissement ($FS = 1$).

Les résultats sont présentés en bas de la feuille de résultat sous la forme d'un tableau :

N°	Xc	Yc	ϕ	FS	R*	Rs	FS Kranz	Pe	X Pe	Y Pe	θ
92.630	-12.030	42.370	1.007	259.5	100.0	2.595	32.20	101.0	5.956	9.971	

Figure 90 : Représentation des résultats de la vérification de Kranz dans la feuille de sortie de calcul

- Surface de rupture :
 - **Xc** : abscisse du centre de la spirale
 - **Yc** : ordonnée du centre de la spirale
 - **ϕ** : constante de la spirale
- Réaction de l'écran :
 - **Pe** : intensité de la force
 - **X Pe** : abscisse de la force
 - **Y Pe** : ordonnée de la force
 - **θ** : inclinaison de la force
- Résultats :
 - **FS** : facteur de sécurité à la rupture ($FS \approx 1$)
 - **R*** : réaction d'ancrage maximum
 - **Rs** : précontrainte du tirant d'ancrage
 - **FS Kranz** : facteur de sécurité de la méthode de Kranz

3.8.4. Ajouter un massif géosynthétique

Massif géosynthétique : permet d'ajouter un massif géosynthétique.

Par défaut, l'ajout débute en mode graphique. La construction graphique d'un massif géosynthétique comprend les étapes suivantes :

- **Position du bas du massif** : permet de définir la position la plus basse du massif géosynthétique. Celle-ci désigne l'ordonnée du dernier lit
- **Position du haut du massif** : permet de définir la position la plus haute du massif géosynthétique. Celle-ci désigne l'ordonnée du 1^{er} lit
- **Longueur des lits** : permet de définir la longueur des lits, le fonctionnement est ici le même que pour la définition de la longueur d'un clou
- **Inclinaison des lits** : permet de définir l'inclinaison des lits, le fonctionnement est ici le même que pour la définition de l'inclinaison d'un clou

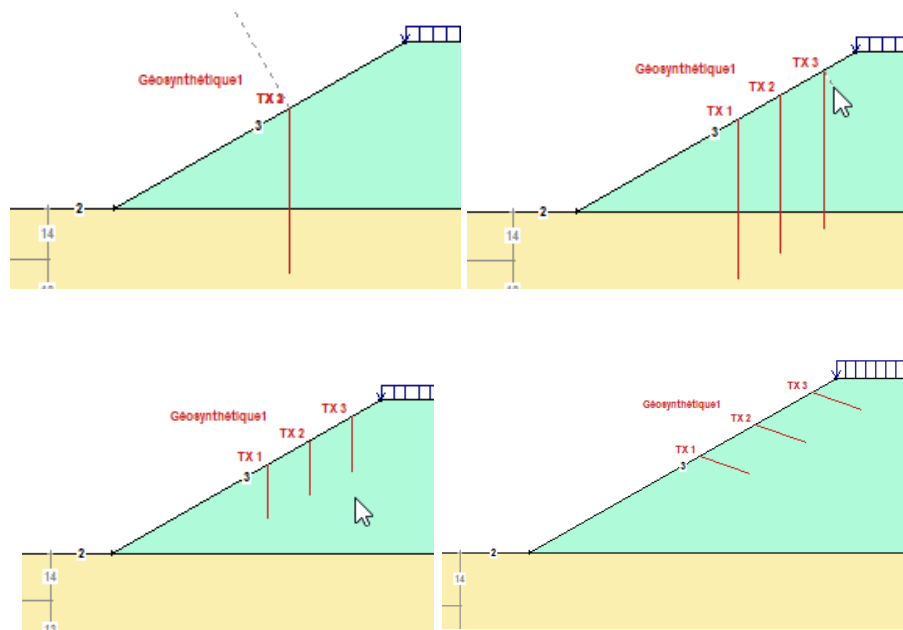
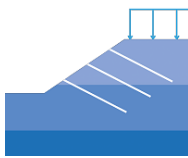


Figure 91 : procédure de définition graphique d'un massif géosynthétique

Ces informations peuvent également être saisies manuellement, depuis la fenêtre de propriété du massif géosynthétique.

Une fois la géométrie du massif renseignée, des informations complémentaires sont à renseigner :

- **Le nombre de lits** constituant le massif
- **Espacement des armatures** permet de choisir une distance à respecter entre les lits du massif. L'espacement ne peut pas dépasser la longueur du segment divisé par le nombre de lits – 1. Une modification de l'espacement entre les armatures à nombre de lits fixé peut modifier la position de la tête du massif.
- **Résistance de l'armature** [kPa], permet de renseigner la résistance de l'armature du massif.
- **Résistance de l'attache** [kPa] permet de renseigner la résistance de l'attache.
- **Angle de frottement interne** [°] permet de renseigner l'angle de frottement interne.
- **Cohésion** [kPa] permet de renseigner la cohésion.

3.8.5. Ajouter un massif en sol renforcé

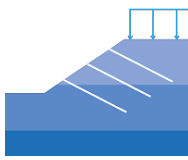
Massif en sol renforcé permet d'ajouter un massif en sol renforcé. Par défaut, l'ajout débute en mode graphique. La construction graphique d'un massif en sol renforcé est identique à la construction d'un massif géosynthétique (3.8.4).

Les massifs en sol renforcés nécessitent la saisie de paramètres les distinguant des massifs géosynthétiques :

Epaisseur de l'armature [m]	0
Epaisseur de la corrosion [m]	0
μ_0	0
Adhérence	☒ Haute adh...
Contrainte de référence	0

Figure 92 : propriétés particulières du massif en sol renforcé

- **Epaisseur de l'armature** [m] permet de renseigner une épaisseur pour l'armature du massif.



- **Epaisseur de la corrosion** [m] permet de renseigner une épaisseur pour la corrosion présente sur le massif.
- μ_0 : coefficient d'interaction sol/lit de renforcement
- **Adhérence** : type de prise en compte du contact sol/lit de renforcement : « **haute adhérence** » ou « **lisse** ».
- **Contrainte de référence** : permettant de renseigner une contrainte de référence pour tous les massifs.

3.8.6. Ajouter un massif grille tressé

Massif grille fil tressé : permet d'ajouter un massif en grille de fil tressé. Par défaut, l'ajout débute en mode graphique. La construction graphique d'un massif en grille tressé est identique à la construction d'un massif géosynthétique (3.8.4).

3.8.7. Ajouter un massif treillis

Massif treillis : permet d'ajouter un massif treillis. Par défaut, l'ajout débute en mode graphique. La construction graphique d'un massif treillis est identique à la construction d'un massif géosynthétique (3.8.4).

3.9. Paramètres sismiques



L'ajout de conditions sismiques au modèle se fait à l'aide du bouton ci-dessus. Un clic permet d'ouvrir le menu de saisie des conditions sismiques.

La vérification sismique de la stabilité se fait par rotation de la géométrie, sauf si cette rotation amène des segments en surplomb (ajout d'efforts dans les équations).

Le séisme n'est activé que pour le cas courant.



Figure 93 : barre des menus du module de saisie des conditions sismiques

Trois paramètres doivent être renseignés dans la fenêtre de propriétés :

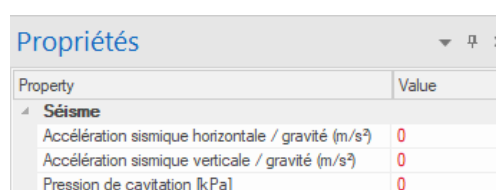
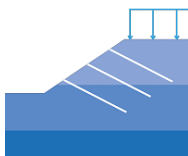


Figure 94 : fenêtre de propriétés lors de l'ajout des conditions de séisme



- **Accélération sismique horizontale / gravité** [m/s²] permet de renseigner une accélération horizontale (coefficient en application de l'EC8-5) :

$$\sigma_h = \frac{1}{r} a_{gr} \gamma_l \frac{S}{g}$$

- **Accélération sismique verticale / gravité** [m/s²] permet de renseigner une accélération verticale (coefficient en application de l'EC8-5) :

$$\sigma_h = \pm 0,5 \sigma_v$$

La valeur de σ_v doit être supérieure à 0 pour un séisme allégeant, et inférieure à 0 pour un séisme pesant.

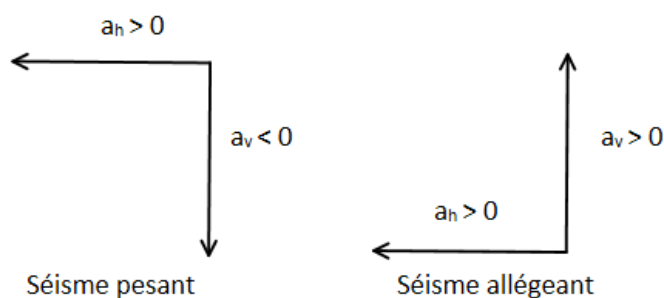
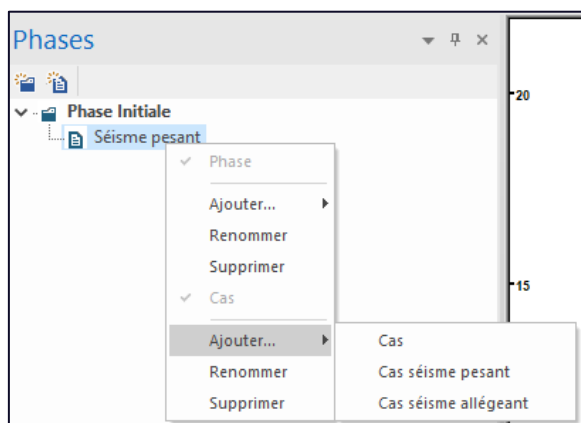


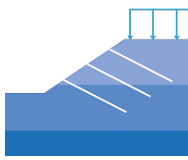
Figure 95 : différences entre un séisme pesant et allégeant

- **Pression de cavitation** [kPa] permet de saisir une pression de cavitation. Elle est utilisée par les calculs suivant la méthode de Carter. Elle correspond à l'augmentation ou diminution de la pression interstitielle causée par le séisme. Les pressions interstitielles peuvent devenir négatives pour les sols saturés mais ne peuvent pas excéder la pression de cavitation spécifiée.

Après avoir renseigné les paramètres sismiques pour un cas il est possible de créer le cas équivalent (pesant ou allégeant) depuis la fenêtre de gestion des phases.

Cette option est proposée par défaut lors de l'ajout d'un nouveau cas.





3.10. Coefficients de sécurité partiels



L'ajout de coefficients de sécurité partiels au modèle se fait à l'aide du bouton ci-dessus. Un clic permet d'ouvrir le menu de définition des coefficients de sécurité partiels.

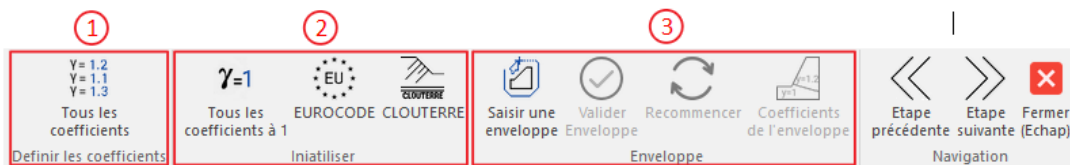
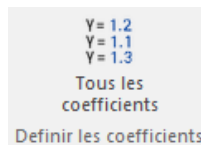


Figure 96 : barre des menus du module de saisie des coefficients partiels

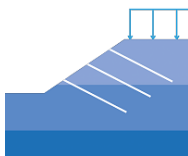
① **Définir les coefficients** permet de définir la valeur de chacun des coefficients de sécurité partiels intégrés au modèle.



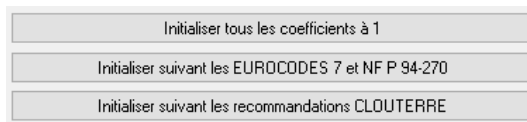
Le sous-menu comporte un unique bouton affichant la fenêtre de définition suivante :

Figure 97 : fenêtre de saisie des coefficients de sécurité partiels

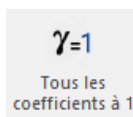
Cette fenêtre comprend plusieurs champs de saisie permettant de définir les valeurs des coefficients de sécurité partiels impactant les éléments constitutifs du modèle.



Note : si certains coefficients de sécurité partiels sont uniques (comme le coefficient de pondération des caractéristiques de l'acier par exemple, qui affecte de la même manière tous les éléments acier intégrés au modèle), certains coefficients affectant un type d'objet peuvent être différenciés afin de distinguer des situations ou comportement différents. C'est le cas par exemple des pondérations s'appliquant aux forces et surcharges, sur lesquelles les conditions d'application (durée d'application, nature favorable ou défavorable de la charge) ont un impact.



Afin de faciliter la saisie des coefficients de sécurité partiels, qui peut s'avérer fastidieuse dans certaines situations de calcul complexes impliquant de nombreux éléments, GeoStab propose des options permettant d'affecter automatiquement des combinaisons de coefficients de sécurité partiels classiques à l'ensemble des éléments du modèle :



- **Initialiser tous les coefficients à 1 :** ramène à 1,0 la valeur de l'ensemble de coefficients de sécurité partiels



- **Initialiser suivant les EUROCODES 7 et NF P 94-270 :** permet d'appliquer à l'ensemble des éléments du modèle les pondérations partielles correspondant à l'une des approches de l'Eurocode 7.

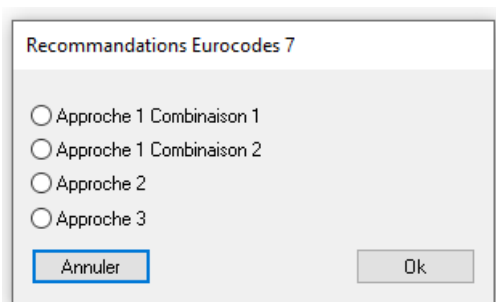


Figure 98 : fenêtre de choix d'approche pour les Eurocodes

Après avoir choisi l'approche de l'Eurocode, une fenêtre s'ouvre permettant d'associer chacun des éléments du modèle aux pondérations lui correspondant par le biais d'un cliqué-glissé dans le tableau.

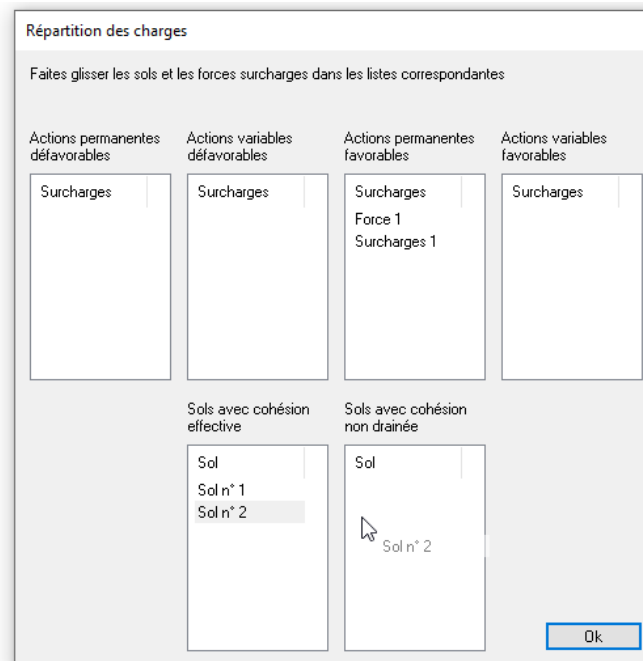
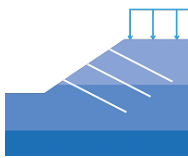


Figure 99 : fenêtre de répartition des éléments

- Initialiser suivant les recommandations CLOUTERRE : permet d'appliquer à l'ensemble des éléments du modèle les pondérations partielles correspondant à l'une des combinaisons des recommandations Clouterre :

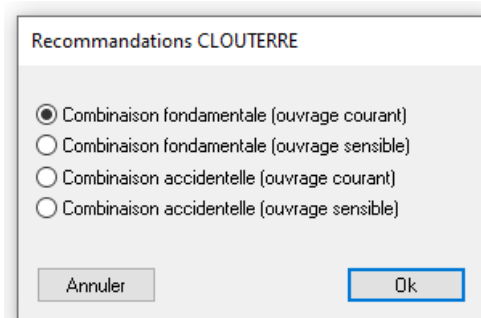
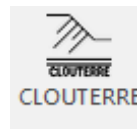


Figure 100 : fenêtre de choix de la combinaison

- ③ **Enveloppe** : permet de saisir graphiquement une enveloppe correspondant à une zone du modèle à laquelle seront appliqués des coefficients de sécurité partiels distinct de ceux s'appliquant au reste du modèle.

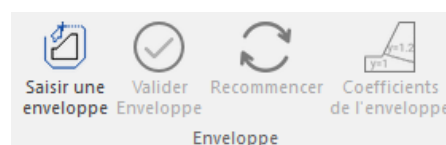
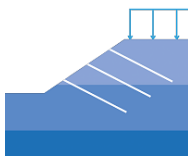


Figure 101 : sous-menu de gestion de l'enveloppe



- **Saisir une enveloppe** : l'enveloppe est définie graphiquement comme une chaîne de segments (cf 3.4.1.1) dont les extrémités sont positionnées sur le terrain naturel.

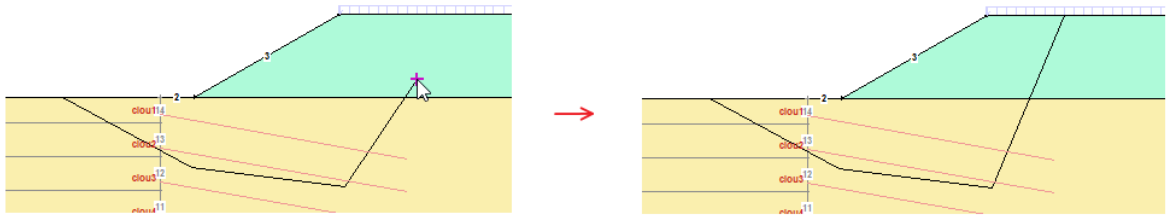


Figure 102 : construction graphique d'une enveloppe

Note : L'enveloppe doit être composé d'un unique polygone représenté par les segments de l'enveloppe et les segments du terrain naturel. Le logiciel fusionnera automatiquement les polygones à la validation :

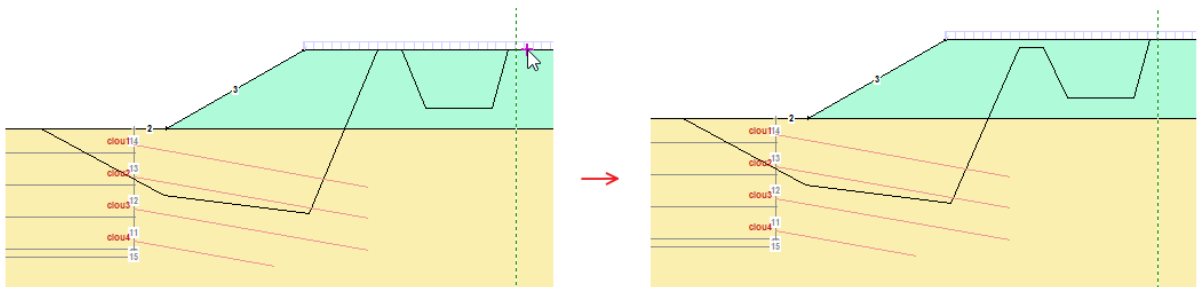


Figure 103 : fusion des polygones d'une enveloppe en un seul

Une fois l'enveloppe tracée, elle doit être validé à l'aide du bouton « Valider enveloppe » dans la barre de menus

- **Coefficients de l'enveloppe** : permet d'ouvrir la fenêtre permettant de configurer les coefficients des éléments à l'intérieur de l'enveloppe :

Coefficients de sécurité partiels (intérieur de l'enveloppe seulement)

Coefficients de sécurité pour les sols

pour le sol n° < >

Poids volumique Appliquer à tous les sols

Frottement latéral Appliquer à tous les sols

Cohésion

Tangente phi

Pression limite

Acier

Forces

Charges

☐ Appliquer les dernières valeurs à tous les éléments en quittant

Initialiser tous les coefficients à 1

Initialiser tous les coefficients suivant la norme expérimentale XP P 94-240 : 1998

pour le massif n° < >

Géotextile (armatures) (attaches) (adhérence) Appliquer à tous les massifs

pour le massif n° < >

Sol renforcé (armatures) (attaches) (adhérence) Appliquer tous les massifs

pour le massif n° < >

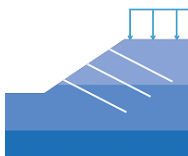
Grillage de fil tressé (armatures) (attaches) (adhérence) Appliquer à tous les massifs

pour le massif n° < >

Trellis soudé (armatures) (attaches) (adhérence) Appliquer à tous les massifs

Ok Annuler

Figure 104 : fenêtre de saisie des coefficients partiels de sécurité à l'intérieur de l'enveloppe



Le bouton « Initialiser tous les coefficients suivant la norme expérimentale XP P 94-270 : 1998 » permet d'initialiser les coefficients selon 4 combinaisons :

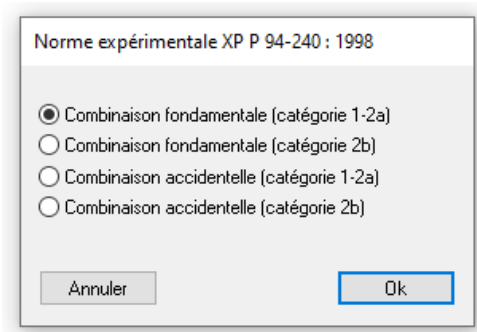
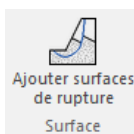


Figure 105 : fenêtre de choix de combinaison de la norme XP P94-270 pour l'enveloppe

- **Combinaison fondamentale (catégorie 1-2a)**
- **Combinaison fondamentale (catégorie 2b)**
- **Combinaison accidentelle (catégorie 1-2a)**
- **Combinaison accidentelle (catégorie 2b)**

3.11. Ajouter une surface de rupture



L'ajout de surfaces de ruptures au modèle se fait à l'aide du bouton ci-dessus. Cliquer sur le bouton remplace la barre de menus par celle relative à la configuration de la génération des surfaces de ruptures.

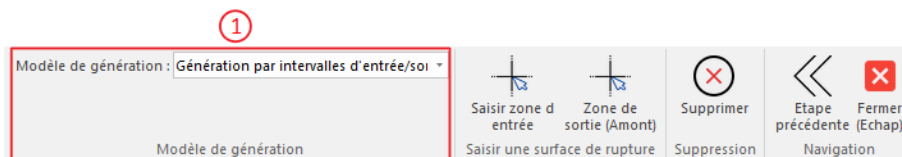


Figure 106 : barre des menus du module de saisie des surfaces de ruptures

1 **Modèle de génération** : permettant de choisir le modèle de génération des surfaces de ruptures parmi la liste déroulante

Le sous-menu se compose d'une unique liste déroulante constituée de 8 choix :

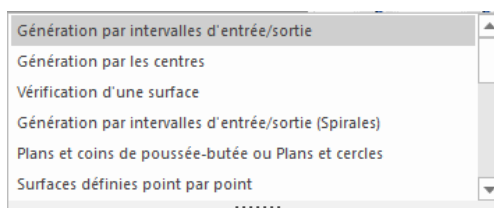
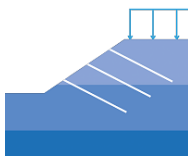


Figure 107 : liste déroulante de choix du mode de génération

Changer de mode de génération agit sur les propriétés disponibles dans la fenêtre de propriétés ainsi que sur les boutons disponibles de la barre des menus et leur comportement.



3.11.1. Génération par intervalles d'entrée/sortie

Génération par intervalles d'entrée/sortie : (surface cercles), permet de saisir un intervalle d'entrée et un intervalle de sortie pour la génération de surfaces de rupture de type circulaire. Les points d'intersection des cercles avec le terrain naturel sont nécessairement compris dans les zones d'entrée et de sortie.

Hors application spécifiques, c'est le mode de génération de surfaces de ruptures à privilégier.

La fenêtre de propriétés et les boutons de saisie de la barre des menus auront l'apparence suivante :

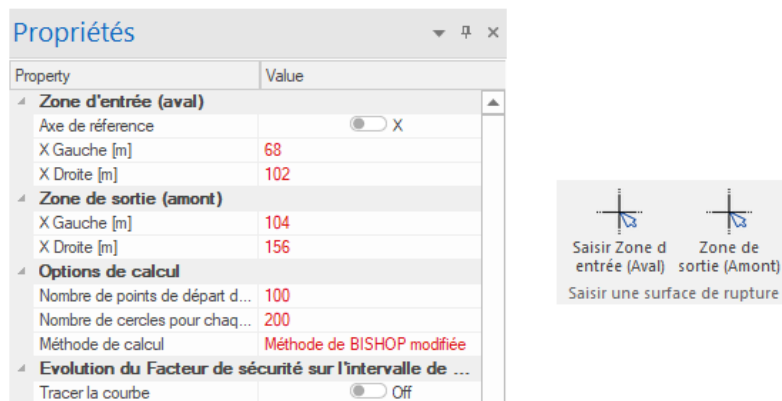


Figure 108 : fenêtre de propriétés du mode « Génération par intervalles d'entrée/sortie »

La saisie peut se faire de manière manuelle ou graphique :

3.11.1.1. Saisie manuelle d'intervalles d'entrée/sortie

La saisie manuelle se fait à l'aide des champs de la fenêtre de propriétés. Les propriétés sont au nombre de 9 :

- **Axe de référence** : permettant de choisir de définir la zone d'entrée en fonction des abscisses ou des ordonnées grâce à un interrupteur. Par défaut, l'axe de références sera celui des « X », représenté par l'interrupteur en position éteinte.

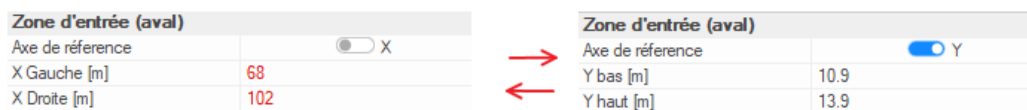
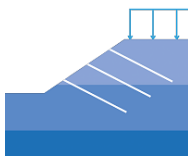


Figure 109 : changement de propriété lié au choix de l'axe de référence

- **X gauche et droite** : représentent les abscisses gauche et droite des zones d'entrée et de sortie des cercles.
- **Nombre de points de départ dans la zone aval** : permet de choisir le nombre de points de départ des cercles dans la zone aval. La valeur par défaut est 100.
- **Nombre de cercles pour chaque point de départ** : permet de choisir le nombre de cercles générés pour chaque point de départ de la zone aval.

Nota : le nombre total de cercles généré pour un cas de calcul correspond au produit du nombre de point de départ et du nombre de cercles par point de départ. Les valeurs par défaut permettent de générer 20 000 cercles par cas de calcul.

- **Méthode de calcul** : permet de choisir la méthode de calcul parmi du facteur de sécurité.



- **Tracer la courbe** : permet de tracer un graphique correspondant à l'évolution du facteur de sécurité sur l'intervalle de sortie en fonction de la distance à la crête. Lorsqu'il est actif, les propriétés suivantes apparaissent :

Evolution du Facteur de sécurité sur l'intervalle de ...	
Tracer la courbe	☒ On
Nombre de subdivisions d...	20
FS = 1	☐ Off
FS = 1.3	☐ Off
FS = 1.5	☐ Off

Figure 110 : ajout de propriétés à définir lors de l'activation de la propriété « Tracer la courbe »

Les 3 interrupteurs (« FS = 1 », « FS = 1.3 », « FS = 1.5 ») permettent d'ajouter des marqueurs sur le graphique représenté par des lignes pointillées violettes.

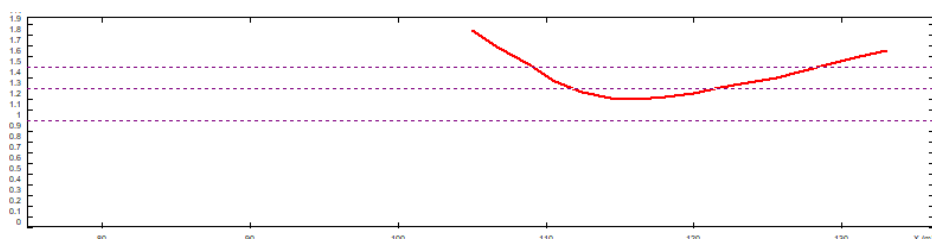


Figure 111 : exemple d'une courbe de facteur de sécurité sur la feuille de sortie

3.11.1.2. Saisie graphique d'intervalles d'entrée/sortie

La procédure de saisie graphique dépend de l'axe de référence choisi dans les propriétés :

- **Zone d'entrée :**
 - **Axe de référence X** : lorsque le bouton est utilisé, une ligne verte verticale représentant l'abscisse gauche de la zone d'entrée se met à suivre le curseur. Les extrémités gauche et droite de la zone d'entrée sont validées par un clic gauche

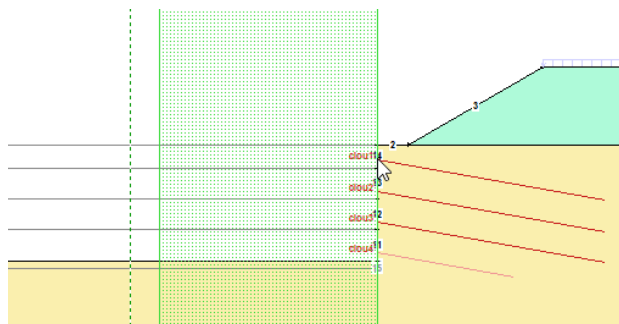


Figure 112 : saisie graphique de la zone d'entrée selon l'axe X

- **Axe de référence Y** : le principe est le même que pour l'axe X

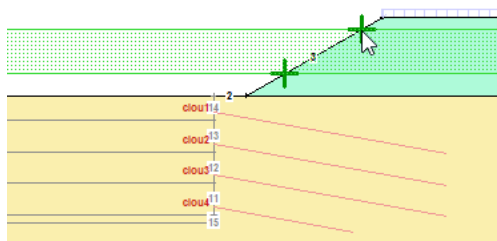
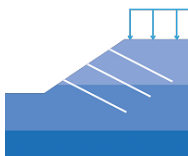


Figure 113 : saisie graphique de la zone d'entrée selon l'axe Y



- **Zone de sortie :**

La définition de la zone de sortie suit le même principe que celle de la zone d'entrée

Il est important de noter que :

- La zone d'entrée doit toujours être située à l'aval et la zone de sortie à l'amont.
- Les zone d'entrée et de sortie ne doivent pas se chevaucher.
- Afin d'approcher au mieux la surface la plus défavorable, il est nécessaire de générer un nombre conséquent de cercles. Pour des zones d'entrée ou de sortie de très grande dimensions (pluri-décimétrique), il peut être intéressant d'augmenter le nombre de cercles générés par le logiciel.
- Seules les 10 surfaces de rupture les plus défavorables sont affichées dans les résultats du calcul.

3.11.2. Génération par les centres

Génération par les centres : (surface cercles), permet de saisir une boîte contenant les centres des cercles de ruptures. L'obtention des surfaces les plus défavorables est moins systématique que pour les mécanismes de génération basés sur l'entrée/sortie. La fenêtre de propriétés et les boutons de saisie de la barre des menus ont l'apparence suivante :



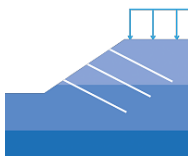
Figure 114 : fenêtre de propriétés du mode « Génération par les centres »

La saisie peut se faire de manière manuelle ou graphique :

3.11.2.1. Saisie manuelle d'une boîte de centres

La saisie manuelle se fait à l'aide des champs de la fenêtre de propriétés. Les propriétés sont au nombre de 12 :

- **Coordonnées (X ; Y) des coins :** permet de définir les abscisses et ordonnées du coin inférieur gauche et du coin supérieur droit de la boîte de centres.
- **Nombre de centres selon X/Y :** permet de définir nombre de centres de cercles de rupture à calculé dans les deux directions.
- **Nombre de tranches par cercle :** permet de configurer en combien de tranches de sol chaque cercle sera segmenté (cf. Méthode des tranches).
- **Méthode de génération :** permet de choisir la méthode de génération des cercles parmi 4 méthodes. Chaque méthode possède des propriétés propres :
 - **Définition par les rayons :** les cercles sont définis par un rayon minimal et maximal et par un nombre des cercles générés par centre.



Méthode de génération	Definition par les rayons
Rayon minimum [m]	0
Rayon maximum [m]	0
Nombre de cercle par centre	0

Figure 115 : propriétés spécifiques à la méthode de génération « Définition par les rayons »

- **Point de passage imposé pour le rayon minimum** : permet de définir les coordonnées d'un point de passage obligatoire pour le cercle au rayon minimum. La propriété « **Variation du rayon au-delà du rayon** » permet de choisir une variation maximale de rayon par rapport au rayon minimum généré.

Méthode de génération	Point de passage imposé pour le rayon minimum
Abscisse du point imposé [m]	0
Altitude du point imposé [m]	0
Nombre de cercle par centre	0
Variation du rayon au-delà du rayon [m]	0

Figure 116 : propriétés spécifiques à la méthode de génération « Points de passage imposé pour le rayon minimum »

- **Rayon minimum tangent au terrain naturel** : permet d'imposer que le cercle de rayon minimum soit tangent au terrain naturel. Il faut ensuite renseigner le nombre de cercle par centre et la variation du rayon maximum par rapport au rayon minimum généré.

Méthode de génération	Rayon minimum tangent au terrain naturel
Nombre de cercle par centre	0
Variation du rayon au-delà du rayon [m]	0

Figure 117 : propriétés spécifiques à la méthode de génération « Rayon minimum tangent au terrain naturel »

- **Rayon minimum tangent au toit d'une couche** : permet d'imposer que le cercle de rayon minimum soit tangent au toit d'une couche de sol existante. Il faut ensuite renseigner le nombre de cercle par centre et la variation du rayon maximum par rapport au rayon minimum généré ainsi que le numéro de la couche de sol.

Méthode de génération	Rayon minimum tangent au toit d'une couche
Nombre de cercle par centre	0
Variation du rayon au-delà du rayon [m]	0
Numéro du sol dont le toit est tangent au cercle	0

Figure 118 : propriétés spécifiques à la méthode de génération « Rayon minimum tangent au toit d'une couche »

- **Méthode de calcul** : permet de choisir la méthode de calcul.

3.11.2.2. Saisie graphique d'une boîte de centres

La boîte de centres peut être également saisie graphiquement via le bouton « **Boîte** » de la barre de menu.

Les coins inférieur gauche et supérieur droit de la boîte de centre sont ensuite fixés par un clic aux coordonnées souhaitées.

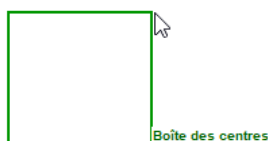


Figure 119 : ajout graphique d'une boîte de centre

Le reste des propriétés doit alors être renseigné dans la fenêtre de propriétés.

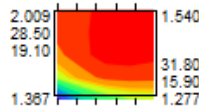
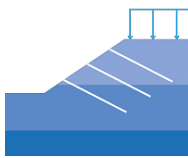


Figure 120 : apparence de la boîte de centres sur la feuille de sortie

Dans les résultats du calcul, la boîte de centres est représentée sous forme de diagramme de chromaticité des valeurs de facteur de sécurité associé à chaque centre.

3.11.3. Vérification d'une surface

Vérification d'une surface : permettant de vérifier une unique surface circulaire définie par un centre et un rayon.

La surface circulaire peut être saisie manuellement ou graphiquement

3.11.4. Génération par intervalles d'entrée/sortie (spirales logarithmiques)

Génération par intervalles d'entrée/sortie (Spirales) : permet de saisir un intervalle d'entrée et un intervalle de sortie pour la génération de surface de rupture de type spirales logarithmiques. Ci-dessous l'aspect de la fenêtre de propriétés et des boutons de saisie pour ce mode de génération :

Property	Value
Zone d'entrée (aval)	
Axe de référence	☒ X
X Gauche [m]	0
X Droite [m]	0
Zone de sortie (amont)	
X Gauche [m]	0
X Droite [m]	0
Options de calcul	
Nombre de points de départ d...	100
Nombre de spirales pour cha...	200
Méthode de calcul	Méthode de Carter étendue
Constante de la spirale	positif (courbée à l'aval)
Type de spirale	Spirale convexe
Evolution du Facteur de sécurité sur l'intervalle de ...	
Tracer la courbe	☐ Off

Figure 121 : fenêtre de propriétés du mode « Génération par intervalles d'entrée/sortie (spirales logarithmiques) »

La saisie manuelle et graphique est identique à la saisie de l'option de génération « **Génération par intervalles d'entrée/sortie (cercles)** » (3.11.1).

Les propriétés qui diffèrent sont relatives à l'aspect des spirales :

- **Constante de la spirale** : permet de choisir le signe de la constante de la spirale d'équation $r=a^{\theta}$. Les deux options sont « **positive (courbée à l'aval)** » ou « **negative (courbée à l'amont)** ». Ci-dessous deux schémas différenciant les deux options :

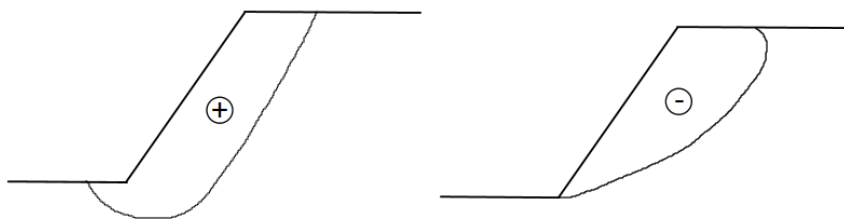
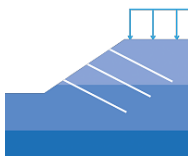


Figure 122 : comparaison des options « positive (courbée à l'aval) » et « négative (courbée à l'amont) »

- « **Type de spirale** », permet de choisir le type de spirale. Les spirales peuvent être convexes (centre vers le haut, adapté à la stabilité des pentes) ou concaves (centre vers le bas, adapté à la méthode de Kranz).
- « **Méthode de calcul** », permet de préciser la méthode de calcul.

Nota : les méthodes de calcul associées aux surfaces en spirales logarithmiques sont la méthode des perturbations et la méthode de Carter simple et étendue.

3.11.5. Plans et coins de poussée-butée ou Plans et cercles

Plans et coins de poussée-butée ou Plans et cercles : permet de générer des surfaces composées de segments reliant des points appartenant à des boîtes définies, et d'autres surfaces comme des cercles ou des coins de poussée-butée aux extrémités.

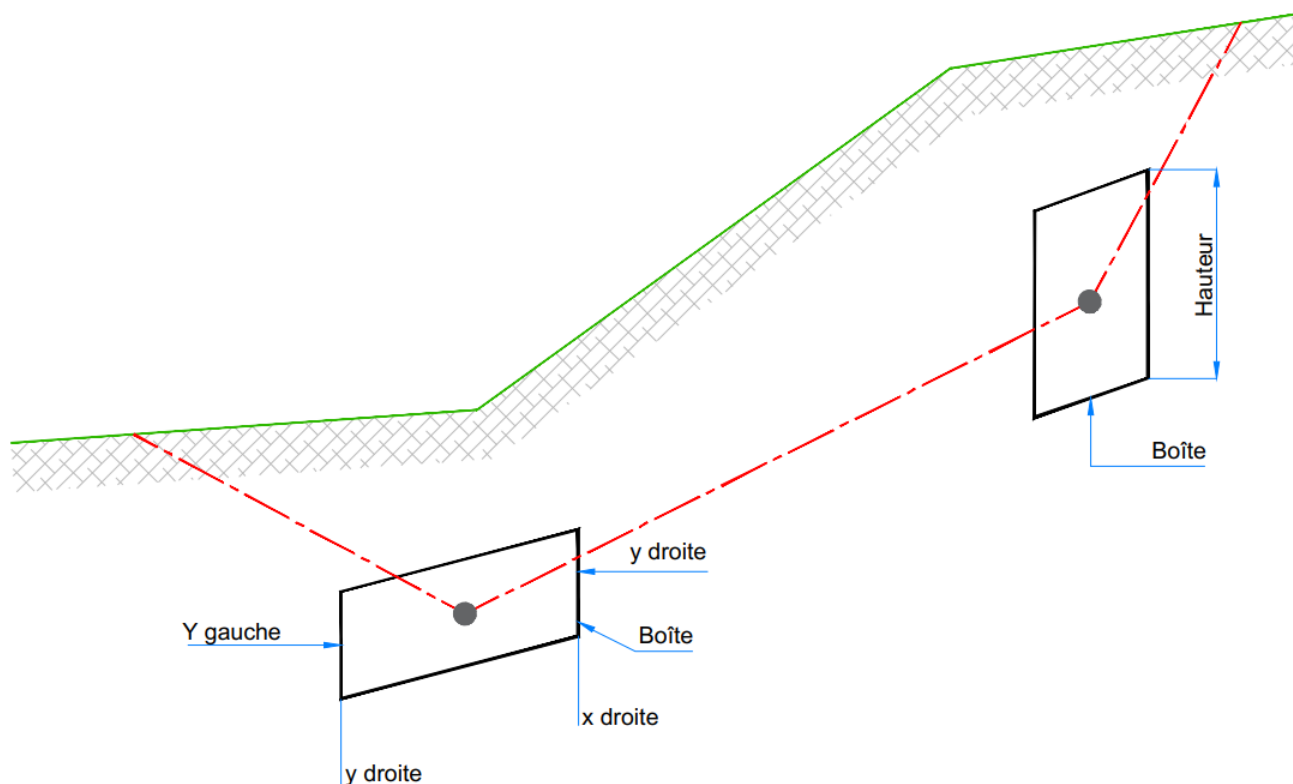
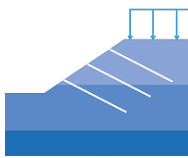


Figure 123 : schéma représentant la manière de générer les surfaces de ruptures du type « Plans et coins de poussée-butée ou Plans et cercles »

La saisie peut se faire de manière manuelle ou graphique :



3.11.5.1. Saisie manuelle d'une boîte de passage

La saisie manuelle se fait à l'aide des champs de la fenêtre de propriété. Les propriétés sont au nombre de 10 :

- **Type de plans** : permet de choisir comment sont générés les liaisons entre les points des boîtes et le terrain naturel. Il y a deux options disponibles :
 - **Plans et coins de poussée-butée** : permet de faire la liaison entre les points des boîtes et le terrain naturel à l'aide de segments plans. Les coins de poussée-butée sont inclinés à $(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2})$ et $(\frac{\pi}{4} - \frac{\phi}{2})$ avec ϕ correspondant à l'angle de frottement de chaque sol, ce qui induit des changements de pente aux interfaces.

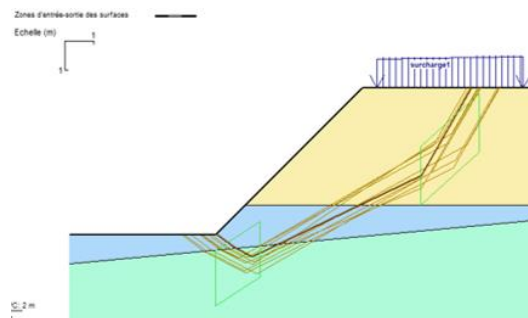


Figure 124 exemple de surfaces générées via le mode « Plans et coins de poussée-butée ou Plans et cercles » avec l'option « Type de plans »

- **Plans et cercles** : permet de faire la liaison entre les points des boîtes et le terrain naturel à l'aide d'arcs de cercles.

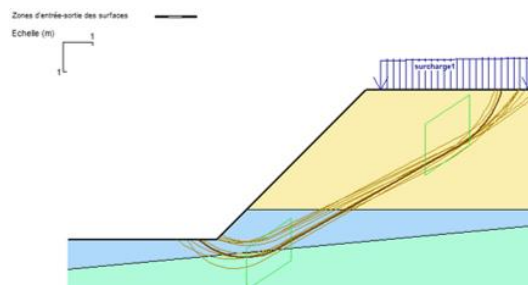


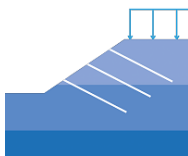
Figure 125 : exemple de surfaces générées via le mode « Plans et coins de poussée-butée ou Plans et cercles » avec l'option « Plans et cercles »

- **Boîte courante** : contient toutes les options permettant de créer une boîte ou de modifier une boîte existante



Figure 126 : saisie d'une boîte de passage

- **Nombre de surfaces générés** : permettant de fixer le nombre de surface à générer.
- **Méthode de calcul** : permettant de choisir la méthode de calcul parmi les 3 options « **Méthode de CARTER étendue** », « Méthode de CARTER simple », « Méthode des perturbations ».



3.11.5.2. Saisie graphique d'une boîte de passage

La saisie graphique permet de dessiner une boîte en 2 étapes :

- Définition, à l'aide d'un clic gauche, des extrémités gauche et droite de la boîte par la création d'un segment.

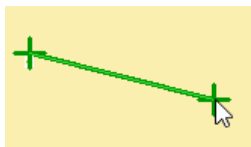


Figure 127 : première étape de saisie graphique d'une boîte de passage

- Définition de la hauteur de la boîte par un mouvement vertical du curseur et validation à l'aide d'un clic gauche. La hauteur de la boîte est ajustée symétriquement par rapport au segment défini dans l'étape précédente.

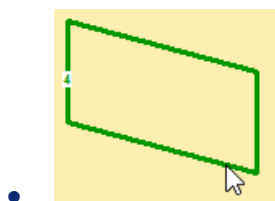


Figure 128 : seconde étape de saisie graphique d'une boîte de passage

Il est important de noter que les boîtes ne doivent pas se chevaucher ni être définie au-delà du terrain naturel. Les coordonnées des boîtes doivent être positive.

3.11.6. Surfaces définies par des points

Surfaces définies par des points : permet de définir graphiquement une surface de rupture quelconque.

Propriétés	
Property	Value
Méthode de calcul	Méthode de Carter étendue
Dernier point créé Y [m]	120
Dernier point créé X [m]	25
Point courant Y [m]	120
Point courant X [m]	25

Figure 129 : fenêtre de propriété du mode de génération de surfaces de ruptures « Surfaces définies par des points »

La surface de rupture se saisie de manière graphique par des clics gauche successifs permettant la création des points constituant la surface ; les points sont reliés par des segments. Le premier et le dernier point doivent être positionnés sur le terrain naturel.

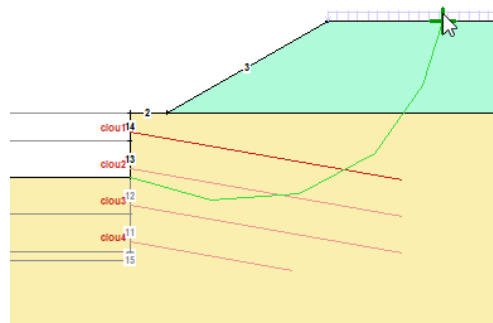
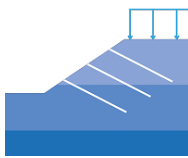


Figure 130 : exemple de surface de rupture définie par des points

3.11.7. Surfaces aléatoires

Surfaces aléatoires : permet de saisir un intervalle d'entrée et un intervalle de sortie pour la génération de surfaces aléatoires. En cas d'anisotropie des caractéristiques mécaniques, les surfaces de rupture préférentielles n'ont pas de forme géométrique simple (cercle, spirale, droite) mais suivent les directions de caractéristiques mécaniques faibles. Seule la recherche aléatoire permet de mettre en évidence de telles surfaces.

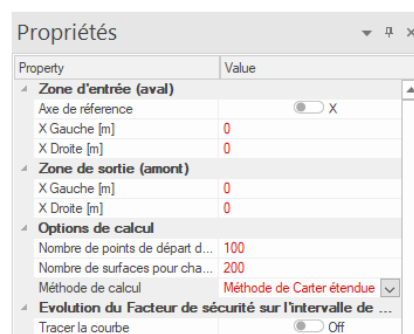


Figure 131 : fenêtre de propriété du mode de génération de surfaces de ruptures « Surfaces aléatoires »

Les saisie manuelle et graphique sont identiques à la saisie des options de génération « **Génération par intervalles d'entrée/sortie** » (cercles et spirales).

3.12. Ajouter une étiquette

Les étiquettes permettent d'annoter un modèle de calcul. Elles ne jouent aucun rôle dans le calcul en lui-même et n'impacte donc pas les résultats.



L'ajout d'étiquettes au modèle se fait à l'aide du bouton ci-dessus. Cliquer sur le bouton remplace la barre de menus par celle relatives à l'ajout d'étiquettes :

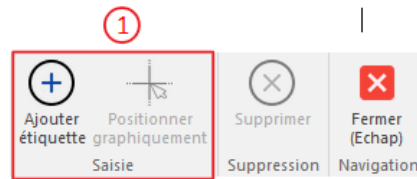
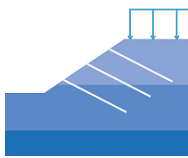


Figure 132 : barre des menus du module de saisie des étiquettes

- ① **Saisie** : permet d'ajouter une étiquette et de la positionner

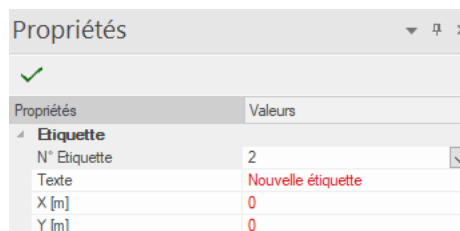


Figure 133 : fenêtre de propriété lors de l'ajout d'une étiquette

3.13. Ajouter un sondage

Les sondages constituent une forme d'annotation du modèle de calcul, ils peuvent notamment aider à la saisie de la stratigraphie du modèle. Ils ne jouent aucun rôle dans le calcul en lui-même et n'impacte donc pas les résultats.

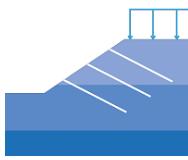


L'ajout de sondage au modèle se fait à l'aide du bouton ci-dessus. Cliquer sur le bouton remplacera la barre de menus par celle relatives à l'ajout de sondage :



Figure 134 : barre des menus du module d'ajout de sondages

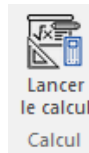
- ① **Saisie** : permet d'ajouter un sondage
- ② **Position** : permet de positionner graphiquement un sondage



4. Calcul et résultats

4.1. Lancement du calcul

Le lancement du calcul se fait via le bouton « **Lancer le calcul** » (2.1.1.2.1 ¹⁷) de la barre des menus.



La fenêtre de sélection des phases et cas de calcul apparaît. L'utilisateur peut alors choisir (en cochant/décochant) les phases et cas à calculer :

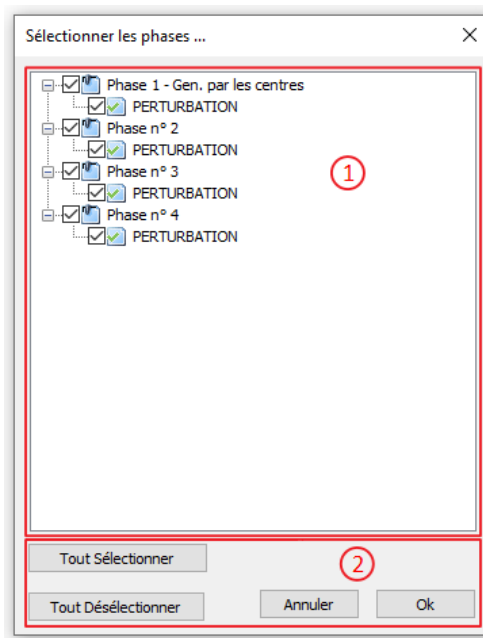
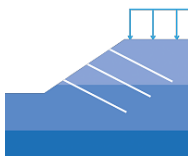


Figure 135 : fenêtre de choix des phases et cas à calculer

Le bouton « Ok » permet de lancer le calcul sur l'ensemble des phases et cas ainsi sélectionnés. Les calculs sont effectués de manière procédurale, dans l'ordre relatif des phases/cas.



4.2. Conditions d'exécution du calcul

Liste		
Phase	Type	
Type	Phase	Message
Phase: Phase 1 - Gen. par les centres		
Type: Erreur		
Erreur	Phase 1 - Gen. par les centres	Impossible de calculer les valeurs de Tmax et T0, il n'y a pas de clous sur le parement
Type: Warning		
Warning	Phase 1 - Gen. par les centres	Le cartouche est vide.
Warning	Phase 1 - Gen. par les centres	Les conditions d'eau n'ont pas été validées.
Phase: Phase n° 2		
Type: Warning		
Warning	Phase n° 2	Les conditions d'eau n'ont pas été validées.
Phase: Phase n° 3		
Type: Warning		
Warning	Phase n° 3	Les conditions d'eau n'ont pas été validées.
Phase: Phase n° 4		
Type: Warning		
Warning	Phase n° 4	Les conditions d'eau n'ont pas été validées.

Figure 136 : liste récapitulative des erreurs de calcul

Avant le lancement du calcul, une vérification automatique est effectuée par le logiciel afin de déterminer s'il présente des erreurs pouvant empêcher le bon déroulement du calcul. Les erreurs sont visibles dans la liste récapitulative des données.

La liste se compose de 3 colonnes

- **Type** : précise le type de problème identifié par le logiciel. Ces problèmes peuvent être de 2 types :
 - **Erreur** : en rouge dans la liste.

Erreur	Phase 1 - Gen. par les centres	Impossible de calculer les valeurs de Tmax et T0, il n'y a pas de clous sur le parement
--------	--------------------------------	---

Les erreurs empêchent l'exécution du calcul et devront être traitées pour pouvoir le lancer.

- **Warning** : en jaune dans la liste.

Warning	Phase 1 - Gen. par les centres	Les conditions d'eau n'ont pas été validées
---------	--------------------------------	---

Figure 137 : Exemple d'un warning

Les warnings n'empêchent pas le calcul mais ont plutôt pour but d'avertir de potentielles anomalies dans le modèle.

- **Phase** : nom et le numéro de la phase qui présente le problème.
- **Message** : descriptif du problème.

Lorsqu'un calcul échoue, la fenêtre suivante apparaît :

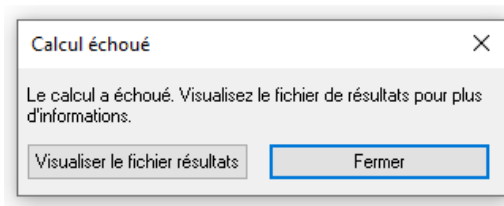


Figure 138 : fenêtre d'échec du calcul

Le bouton « **Visualiser le fichier de résultats** » permet d'afficher la fenêtre suivante :

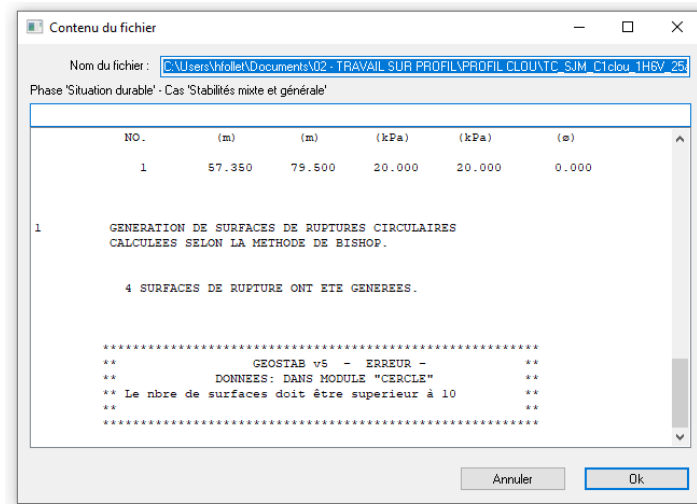
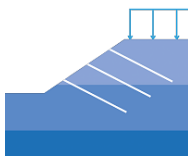


Figure 139 : fenêtre de visualisation des résultats lors de l'échec d'un calcul

La fenêtre affiche le fichier de sortie provenant du noyau de calcul de **GeoStab**. La fin du fichier correspond à la dernière opération qui a échoué effectuée par le noyau de calcul. Un cadre contenant une aide à la résolution de l'erreur empêchant l'exécution du calcul est présent pour vous aider à modifier votre modèle en conséquence.

4.3. Interface de sortie de calcul

Après le calcul, le logiciel affiche automatiquement la fenêtre de résultats :

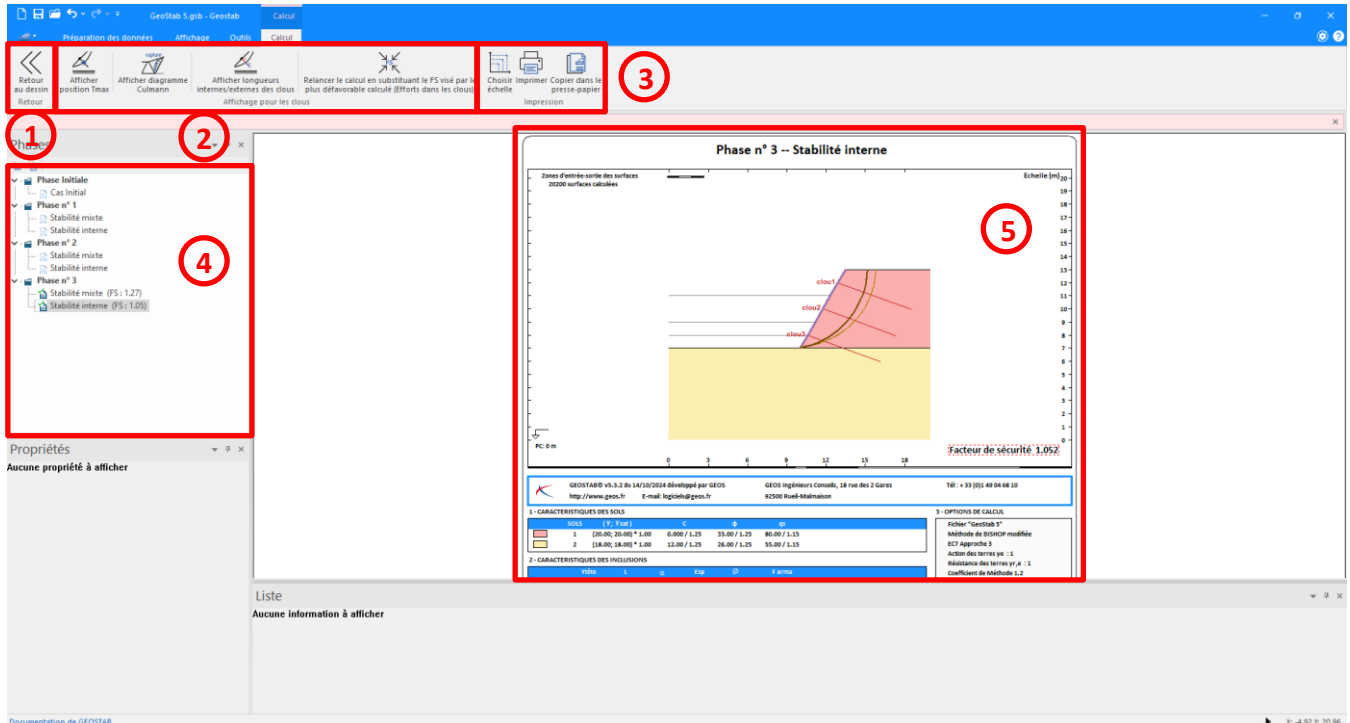
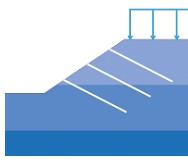


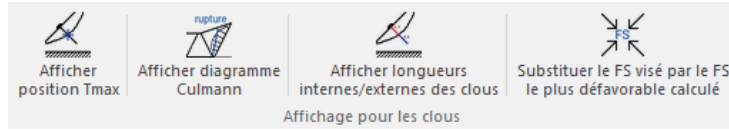
Figure 140 : interface du logiciel en sortie de calculs

La barre de menu est remplacée pour disposer des options relatives à la sortie de calcul :

- ① **Retour au dessin** : permet de revenir sur la fenêtre de saisie du modèle



② **Affichage pour les clous** : regroupe les différentes options d'affichage pour les clous



- **Afficher position Tmax** : permet de représenter par des croix orange la position de l'intersection entre une surface de rupture calculée et un clou ayant généré l'effort interne Tmax le plus important.

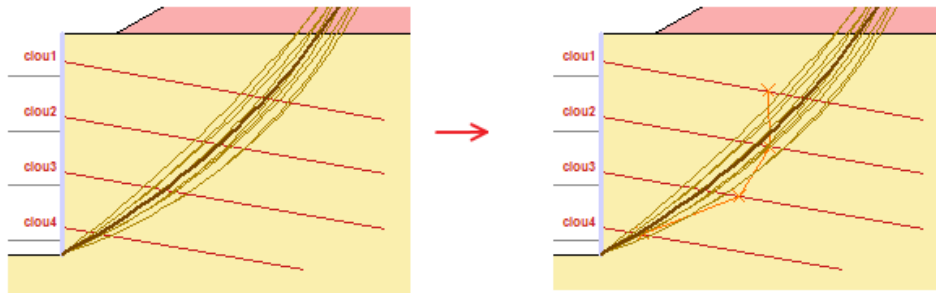


Figure 141 : exemple de l'utilisation de l'affichage des efforts max

Cette option est disponible uniquement si au moins un clou est actif pour le cas courant et si le calcul des efforts dans les clous a été activé (cf. 3.8.1.2.2).

- « **Afficher diagramme Culmann** » : permet d'afficher le diagramme de Culmann

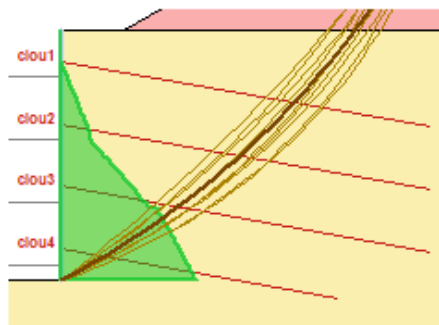


Figure 142 : affichage du diagramme de Culmann

- **Afficher les longueurs internes/externes des clous** : permet de surligner les longueurs interne et externe des clous et de faire apparaître leur valeur.

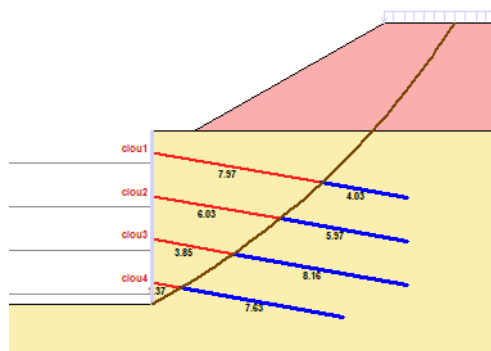
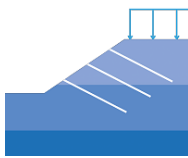


Figure 143 : affichage des longueurs internes et externes des clous



- **Substituer le FS visé par le FS le plus défavorable calculé** : permet de substituer les facteurs de sécurités visés (cf. 3.8.1.2.2) de chaque cas par le facteur de sécurité le plus défavorable calculé. Relancer le calcul est nécessaire.

③ **Impression** : regroupe les options d'export du fichier de sortie

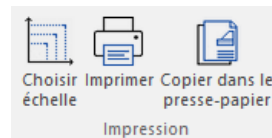


Figure 144 : sous-menu d'impression

④ **Fenêtre des phases** : permet de naviguer entre les différentes feuilles de résultats des phases/cas

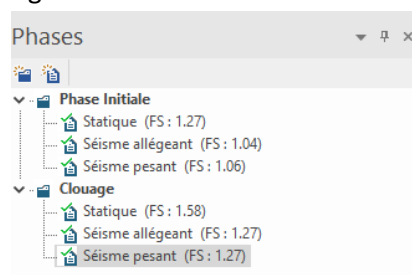
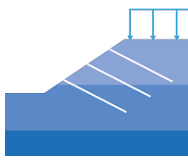


Figure 145 : fenêtre des phases et cas de la sortie de calcul

⑤ **Feuille de sortie de calcul** : visualisation de la feuille de sortie des calculs (cf §4.4).



4.4. Feuille de sortie de calcul

La feuille de sortie de calcul se présente comme suit :

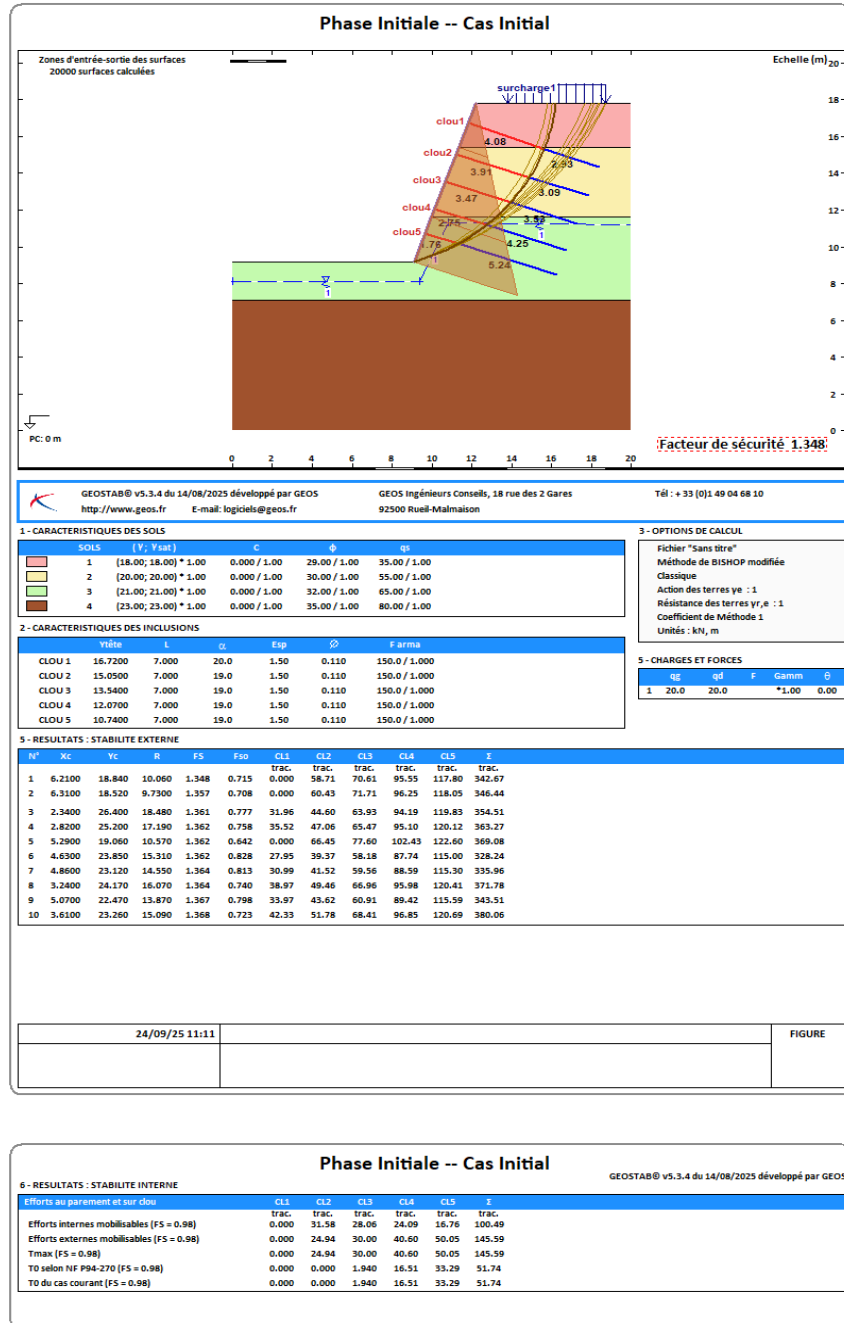
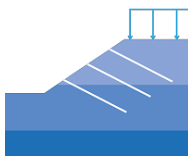


Figure 146 : exemple d'une feuille de sortie

① **Cartouche** : reprenant les informations du cartouche

L'entête de la feuille de sortie reprend les informations décrites dans le cartouche lors de la saisie (3.2).

② **Dessin du profil**



Le dessin du profil correspond à la partie du profil se trouvant dans le cadre de sortie (3.3.2). L'échelle en mètre du dessin est représentée de part et d'autre du profil. Des informations complémentaires accompagnent le dessin :

- En haut à gauche : Le type de génération de surfaces de ruptures ainsi que le nombre de surfaces de ruptures calculées pour le cas.
- En bas à gauche : la valeur de la position y minimale du dessin
- En bas à droite : le facteur de sécurité critique calculé pour le cas actif

③ Cartouche GEOS

Espace réservé aux informations sur le logiciel et son fournisseur.

④ Données d'entrée

Cet espace synthétise les principales données d'entrées :

- Les caractéristiques des sols
- Les options de calculs
- Les conditions sismiques
- Les charges et forces
- Les caractéristiques des inclusions

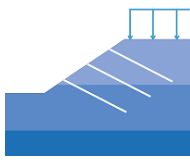
⑤ Résultats de stabilité externe

Ce tableau fournit la géométrie des 10 surfaces de ruptures les plus défavorables calculées par le logiciel ainsi que les efforts maximaux retenus dans les inclusions traversées pour chaque surface de rupture.

⑥ Résultats de stabilité interne

Le tableau liste les informations relatives aux efforts dans les clous. Il n'est visible que si l'option « **Calculer effort Tmax, T0** » est active (cf. 3.8.1.2.2). Le cadre fournit pour chaque clou :

- **Les efforts internes mobilisables** : correspond aux efforts que peut reprendre la longueur interne du clou (cf. 4.3)
- **Les efforts externes mobilisables** : correspond aux efforts que peut reprendre la longueur externe du clou (cf. 4.3)
- **Tmax** : représente l'effort de traction maximal appliqué à un clou
- **T0 selon NFP P94-270** : représente l'effort appliqué au parement par un clou fixé à la phase de mise en place de celui-ci conformément à la NF P94-270
- **T0 du cas courant** : représente l'effort appliqué au parement par un clou, calculé pour la phase courante.



5. Considérations théoriques

5.1. Généralités

En général, l'analyse par équilibre est statiquement indéterminée. L'exemple donné sur la Figure 1 illustre ce fait.

La résultante des forces motrices, R_d , appliquée à la masse de sol située au-dessus de la surface de rupture ainsi que la ligne d'action de R_d peuvent être déterminées directement. Les forces motrices composant R_d comprennent :

- Les forces gravitaires,
- Les forces associées aux tremblements de terre,
- Les poussées d'Archimède si la masse de sol est partiellement ou totalement immergée,
- Les surcharges superficielles appliquées au niveau du terrain naturel à l'intérieur de la zone de rupture.

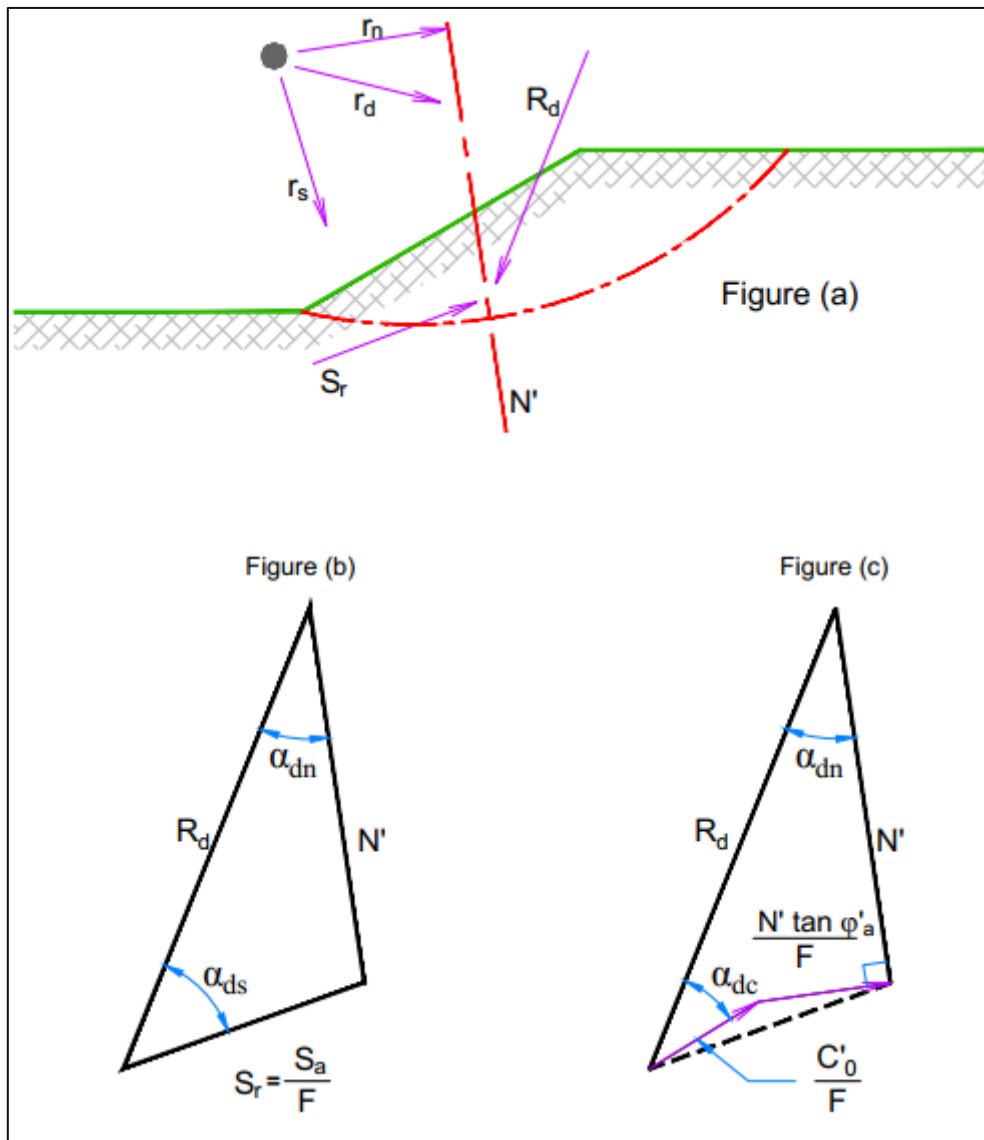
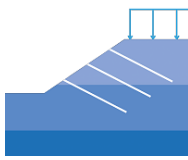


Figure 147 : forces considérées pour l'équilibre limite



La distribution des contraintes normales effectives est inconnue ; la résultante de ces contraintes peut être représentée par une force N' dont l'intensité et la ligne d'action sont inconnues.

La résistance au cisaillement mobilisée le long de la surface de rupture peut être remplacée par une force de cisaillement résultante, S_r , dont la ligne d'action est aussi inconnue.

La résistance au cisaillement mobilisée est celle requise pour assurer l'équilibre limite de la masse située au-dessus de la surface de rupture.

Si la pente est stable, la résistance au cisaillement mobilisée pour assurer l'équilibre n'est qu'une fraction de celle disponible.

Le coefficient de sécurité peut être défini comme étant le rapport entre la résistance au cisaillement disponible et celle mobilisée pour assurer l'équilibre limite :

$$F = \frac{S_r}{S_a} \quad (1)$$

Avec :

- S_a : résultante des forces de cisaillement mobilisables le long de la surface de rupture
- S_r : résultante des forces de cisaillement mobilisées le long de la surface de rupture pour assurer l'équilibre limite.

La force de cisaillement résultante mobilisée pour assurer l'équilibre est donc :

$$S_r = \frac{S_a}{F} \quad (2)$$

La valeur du coefficient de sécurité tel qu'exprimé est une valeur moyenne. Le modèle de l'équilibre limite ne tient pas compte des concentrations de contraintes mais fait l'hypothèse de la proportionnalité entre la résistance au cisaillement mobilisée le long de la surface de rupture et la résistance au cisaillement disponible.

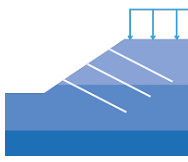
Ayant défini la notion de coefficient de sécurité, une valeur unique de ce dernier doit être déterminée. Pour cela, des relations entre les forces appliquées sont établies ou postulées, la première de ces relations étant celle qui satisfait l'équilibre statique.

Selon la [figure précédente](#), l'équilibre des moments autour d'un point arbitraire "O" donne :

$$R_d r_d - N' r_n - S_r r_s = 0 \quad (3)$$

Avec r_d , r_n et r_s les bras de levier des résultantes R_d , N' et S_r par rapport au point O. Les lignes d'actions des forces N' et S_r étant inconnues, les bras de levier r_n et r_s sont aussi inconnus.

L'équilibre implique aussi que la somme des forces projetées selon toute direction soit nulle. Ceci est vrai en particulier lorsque les forces sont projetées perpendiculairement et parallèlement à la résultante des forces motrices R_d . Ces projections donnent :



$$R_d - S_r \cos(\alpha_{ds}) - N' \cos(\alpha_{dn}) = 0 \quad (4a)$$

$$S_r \sin(\alpha_{ds}) - N' \sin(\alpha_{dn}) = 0 \quad (4b)$$

Avec α_{ds} et α_{dn} les angles entre R_d et S_r et N' respectivement. Les lignes d'action des forces N' et S_r étant inconnues, les angles α_{ds} et α_{dn} sont aussi inconnus.

Le bilan des inconnues et des équations indépendantes les reliant dans l'expression de l'équilibre s'établit à sept inconnues F , S_a , N' , r_n , r_s , α_{dn} , α_{ds} et seulement trois équations à partir desquelles une valeur unique du coefficient de sécurité est recherchée.

Le problème est statiquement indéterminé. Pour lever l'indétermination, des hypothèses doivent être introduites quant aux forces ou aux relations contraintes - déformations.

Dans le cas de méthodes par équilibre limite, le critère de Mohr-Coulomb est applicable et une relation linéaire entre la résistance au cisaillement et la contrainte effective normale est généralement utilisée :

$$\tau_f = c'_f + \sigma'_n \tan \phi'_f \quad (5)$$

Avec :

- τ_f : la résistance au cisaillement mobilisable à la rupture sur la surface de rupture
- c'_f , ϕ'_f : les paramètres effectifs de résistance décrivant l'enveloppe de Mohr-Coulomb (résistance de pic)
- σ'_n : la contrainte effective à la rupture, normale à la surface de rupture.

A la place de la résistance de pic, il est possible d'introduire la résistance résiduelle. Ainsi l'expression (5) peut être écrite de la façon générale suivante :

$$\tau_a = c'_a + \sigma'_n \tan \phi'_a \quad (5a)$$

Avec :

- τ_a , la résistance au cisaillement disponible
- c'_a et ϕ'_a , les paramètres effectifs de résistance décrivant l'enveloppe de Mohr-Coulomb applicable.

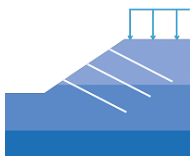
Exprimée en termes de forces, l'expression (5a) devient :

$$S_a = C'_a + N' \tan \phi'_a \quad (6)$$

Avec C'_a , la composante résultante de la résistance au cisaillement disponible qui est indépendante de la distribution des contraintes normales à la surface de rupture.

La force de cisaillement résistante qu'il faut mobiliser sur la surface de rupture pour assurer l'équilibre limite est alors :

$$S_r = \frac{C'_a + N' \tan \phi'_a}{F}$$



En examinant les deux composantes de la force de cisaillement résistante C'_a/F et $(N' \tan \phi'_a)/F$ sur la Fig. 1c, deux observations peuvent être faites:

- l'intensité de la composante C'_a / F dépend seulement du coefficient de sécurité F et sa ligne d'action de la géométrie de la surface de rupture considérée; par conséquent, l'angle α_{dc} de la figure précédente est connu,
- la composante de résistance au cisaillement qui dépend de la distribution de la contrainte normale doit être perpendiculaire à la force normale résultante N' .

Ces deux observations ne permettent pas à elles seules de déterminer la valeur du coefficient de sécurité F et le problème demeure statiquement indéterminé. Pour arriver à déterminer F , il faut faire une hypothèse quant à la distribution des contraintes effectives normales à la surface de rupture de sorte que l'intensité et la ligne d'action de la force résultante N' puissent être établies.

Dans ce cas, N' , α_{dn} et r_n sont connus et les inconnues sont réduites à quatre. Avec les trois équations d'équilibre et la relation entre la résistance au cisaillement et la contrainte normale effective, une valeur de F peut être déterminée. Cette valeur de F dépend des hypothèses faites quant à la distribution des contraintes effectives normales à la surface de rupture.

5.2. Méthode des tranches

Les méthodes les plus couramment utilisées pour l'analyse de la stabilité générale de pente consistent à diviser la masse située au-dessus de la surface de rupture hypothétique en tranches tel qu'indiqué sur la Figure 316. Cette approche permet de tenir compte des hétérogénéités du profil du sol, la masse étant divisée de manière à ce que chaque tranche soit caractérisée à sa base par un seul jeu de paramètres de résistance.

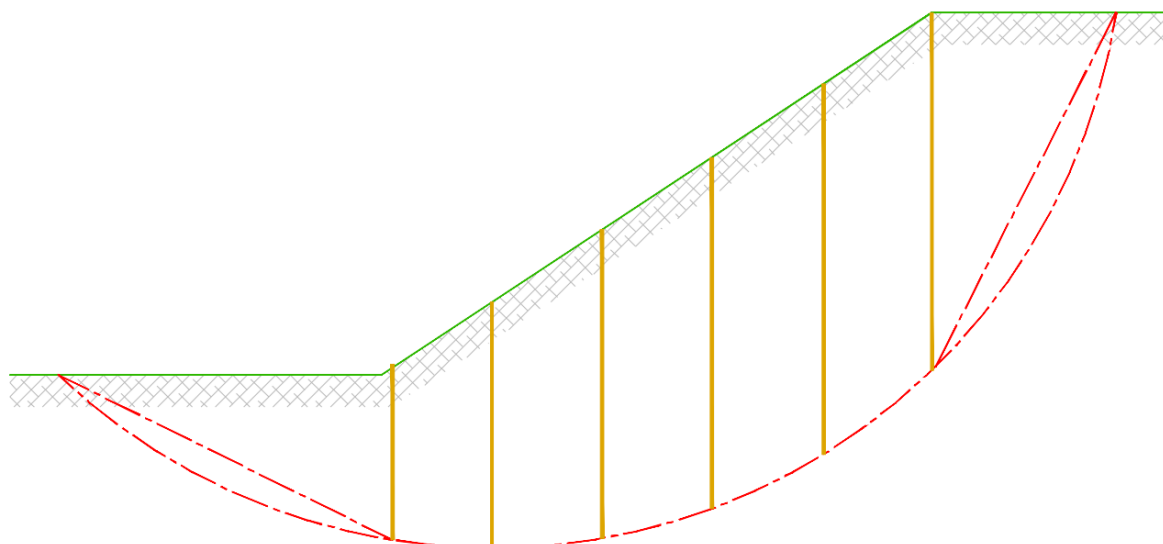
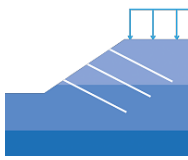


Figure 148 : discrétisation de la surface de rupture en tranches et linéarisation de la base des tranches

Il est pratique d'assimiler la base de chaque tranche à la corde qui sous-tend la surface de cisaillement courbe plutôt qu'à la surface de cisaillement courbe elle-même, l'erreur commise sur l'inclinaison de la base de chaque tranche et sur les poids des tranches étant minime si un nombre adéquat de tranches est utilisé.



Les forces agissant sur chaque tranche sont indiquées sur la Figure 317, le bilan des inconnues et des équations disponibles pour l'analyse de stabilité étant établi dans le Tableau 3 ci-après. Intentionnellement, les autres forces habituellement rencontrées dans les analyses de stabilité (écoulement, surcharges, tremblements de terre) n'ont pas été considérées. Leur prise en compte n'ajoute rien au degré d'indétermination statique mais ne fait que compliquer les expressions mathématiques dérivées.

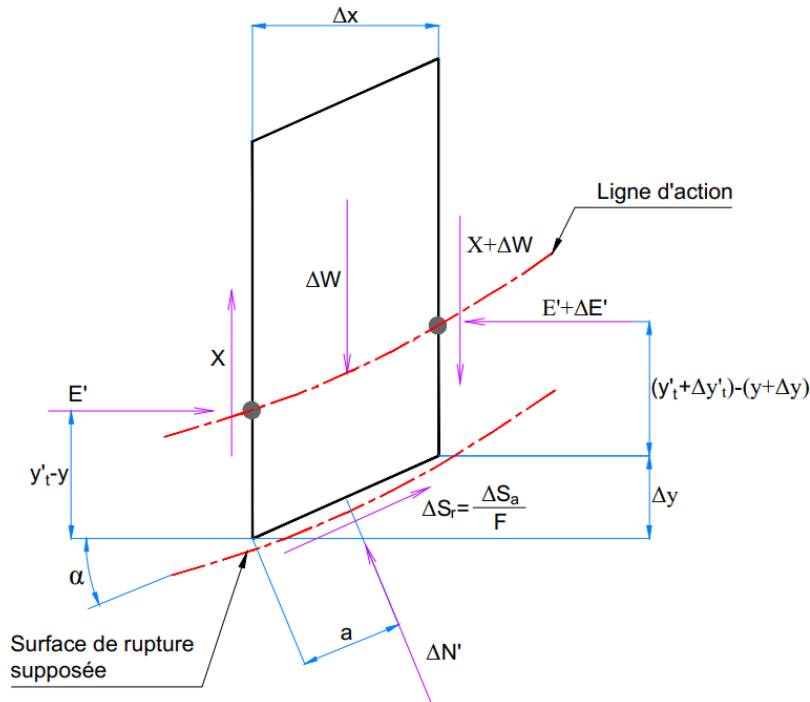


Figure 149 : forces agissant sur une tranche

Selon le Tableau 3 ci-après, il apparaît que le problème est statiquement indéterminé dès que le nombre des tranches est supérieur à 1. Dans ce cas, des hypothèses simplificatrices doivent être faites pour résoudre le problème.

Quand on considère l'équilibre des moments d'une masse de sol située au-dessus d'une surface de rupture circulaire, il n'est pas nécessaire de connaître la position des efforts effectifs normaux à la base de chaque tranche, $\Delta N'$, si l'équilibre des moments est effectué par rapport au centre de la surface circulaire.

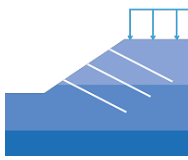
Tous les efforts $\Delta N'$ ont une ligne d'action passant par le centre du cercle et ils ne produisent aucun moment par rapport à ce point.

Dans ce cas, l'équation d'équilibre des moments par rapport au centre du cercle devient :

$$\sum_1^n \Delta W \cdot r \cdot \sin \alpha - \sum_1^n \Delta S_r \cdot r = 0 \quad (8)$$

Avec :

- ΔW le poids des tranches individuelles
- r le rayon du cercle
- α l'inclinaison de la base de chaque tranche
- ΔS_r la force résistante de cisaillement agissant à la base de chaque tranche
- n le nombre de tranches



La force résistante, ΔS_r , agissant le long de la base de chaque tranche est définie comme étant la somme des composantes de résistance de cohésion et de frottement disponibles divisée par le coefficient de sécurité, F :

Avec :

$$\Delta S_r = \frac{\Delta C'_a + \Delta N' \tan \phi'_a}{F} \quad (9)$$

- $\Delta N'$ la résultante de la contrainte effective normale appliquée à la base de la tranche
- $\Delta C'_a$ la résultante de la résistance au cisaillement disponible à la base de la tranche qui est indépendante de l'état des contraintes effectives.

En substituant ΔS_r par son expression de l'équation (9) dans l'équation (8), on obtient pour F :

$$F = \frac{\sum_1^n (\Delta C'_a + \Delta N' \tan \phi'_a)}{\sum_1^n \Delta W \sin \alpha} \quad (10)$$

Selon le Tableau 3 en page suivante, le nombre d'inconnues est réduit à $4n-2$ étant donné qu'il n'est pas nécessaire de connaître dans ce cas la position de la force effective normale agissant à la base de chaque tranche. Malgré cela, les 3 équations d'équilibre sont insuffisantes pour rendre le système statiquement déterminé et il est nécessaire de faire des hypothèses complémentaires. Ces hypothèses sont généralement faites sur les forces agissant sur les faces latérales des tranches.

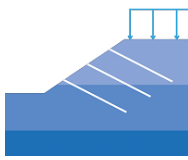
Equations	
n^*	Equations d'équilibre des moments pour chaque tranche
$2n$	Equations d'équilibre des forces dans chacune des deux directions indépendantes pour chaque tranche
n	Loi de Mohr-Coulomb entre la résistance au cisaillement et la contrainte normale effective pour le sol à la base de chaque tranche
$4n$	Nombre total d'équations

Inconnues	
1	Coefficient de sécurité (F)
n	Forces effectives agissant sur la base de chaque tranche (DN)
n	Positions de la force normale effective agissant sur la base de chaque tranche (a)
n	Résistances au cisaillement disponibles à la base de chaque tranche (DS_a)
$n-1$	Forces normales entre tranches (E')
$n-1$	Forces de cisaillement entre tranches (X)
$n-1$	Positions des forces entre tranches (y'_t)
$6n-2$	Nombre total d'inconnues

Tableau 3 : récapitulatifs des équations et des inconnues pour les tranches

*n : nombre de tranches

Les différents paramètres sont décrits sur la [Figure 317](#)



5.3. Méthode de Fellenius

L'hypothèse qui simplifie le plus les calculs a été proposée par Fellenius (1927). Cette hypothèse considère que le bilan des forces latérales dans l'équilibre de la tranche est nul : la force effective normale et la force effective de cisaillement agissant sur la face de gauche de la tranche sont égales mais de signe opposé à celles agissant sur la face de droite.

Si aucune force extérieure n'agit sur les faces extérieures des deux tranches d'extrémité, le cas courant dans les problèmes de stabilité de pente, l'hypothèse requiert que les forces entre tranches agissant sur ces deux tranches d'extrémité soient également nulles. De même, selon le principe de Newton qui stipule l'égalité entre l'action et la réaction, les forces entre tranches seraient aussi nulles pour les tranches intermédiaires, ce qui n'est physiquement pas raisonnable.

En reprenant le Tableau 3, avec l'hypothèse de Fellenius le nombre total d'inconnues est réduit de $3n-3$ après éliminations des forces latérales, ce qui donne un nombre total d'inconnues de $n+1$.

Le problème est donc statiquement sur déterminé, le nombre d'équations étant nettement supérieur au nombre d'inconnues.

La force normale effective à la base de chaque tranche est

$$\Delta N' = \Delta W \cos \alpha$$

Avec ΔW intégrant l'effet de l'eau, y compris déjaugage et surcharge si la nappe est au-dessus du terrain naturel.

Et l'expression du coefficient de sécurité F de l'équation 10 devient :

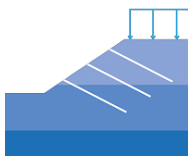
$$F = \frac{\sum_1^n (\Delta C'_a + \Delta W \cdot \cos \alpha \cdot \tan \phi'_a)}{\sum_1^n \Delta W \cdot \sin \alpha} \quad (11)$$

Cette expression ne satisfait pas l'équilibre des forces parallèles à la base de chaque tranche. Aussi, étant donné qu'il n'est pas nécessaire de connaître la position de la force normale à la base de chaque tranche, l'équilibre des moments de chaque tranche n'est pas assuré.

Cette méthode est connue sous le nom de méthode ordinaire des tranches ou méthode de Fellenius.

Il a été montré que le coefficient de sécurité calculé selon cette méthode est inférieur à la borne inférieure calculée par Whitman et Moore (1963). Le coefficient de sécurité est généralement sous-évalué de 10 à 15 %, parfois jusqu'à 60%, par rapport à celui obtenu de méthodes plus précises telles que celles décrites ci-après.

Cette méthode est donc peu précise et elle sous-évalue la valeur du coefficient de sécurité ; elle conduit à des dimensionnements peu économiques.



5.4. Méthode de Bishop

5.4.1. Méthode de Bishop modifiée

Bishop (1955) a proposé une alternative pour obtenir le coefficient de sécurité sans faire intervenir l'effet des forces entre tranches. L'équilibre général des moments est satisfait comme pour la méthode de Fellenius, cependant, l'expression de la force normale effective à la base de chaque tranche est dérivée d'une manière différente.

Dans ce cas, pour chaque tranche, l'équilibre des forces selon la direction verticale est exprimé plutôt que celui selon la normale à la base des tranches et les forces latérales entre tranches sont ignorées. La méthode considère donc, que pour chaque tranche, les forces agissant sur les faces latérales de la tranche ont une résultante verticale nulle.

On obtient, selon la Figure 317 :

$$\Delta W - \Delta S_p \cdot \sin \alpha - \Delta N' \cdot \cos \alpha = 0 \quad (12)$$

En substituant l'expression de la résistance au cisaillement requise de l'expression (9), l'expression de la contrainte normale effective à la base de chaque tranche devient :

$$\Delta N' = \frac{\Delta W - \Delta C'_a \cdot \frac{\sin \alpha}{F}}{\cos \alpha \cdot (1 + \tan \phi'_a \cdot \frac{\tan \alpha}{F})} \quad (13)$$

En substituant l'expression de $\Delta N'$ dans l'expression de l'équilibre général des moments donnée dans l'expression (12) on obtient l'expression implicite suivante du coefficient de sécurité :

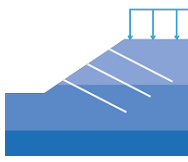
$$F = \frac{\sum_1^n \frac{(\Delta C'_a \cdot \cos \alpha + \Delta W \cdot \tan \phi'_a)}{\cos \alpha \cdot (1 + \frac{\tan \phi'_a \cdot \tan \alpha}{F})}}{\sum_1^n \Delta W \cdot \sin \alpha} \quad (14)$$

La valeur du coefficient de sécurité F est calculée par approximations successives, en partant d'une première valeur sélectionnée qui peut être celle obtenue par la méthode de Fellenius.

La prise en compte des efforts extérieurs revient à ajouter la somme de la composante normale de ces efforts au numérateur et à retrancher la somme de la composante tangentielle au dénominateur de l'équation (14).

Bien que la méthode simplifiée de Bishop ne permette pas de calculer directement le coefficient de sécurité comme la méthode de Fellenius, les valeurs de F obtenues par cette méthode sont beaucoup plus proches de celles obtenues par des méthodes plus précises qui prennent en compte les forces entre tranches (Whitman et Bailey, 1967).

Typiquement, la méthode de Bishop modifiée conduit à une erreur de 1% seulement par rapport à la méthode de Bishop rigoureuse, ce qui la fait préférer nettement à la méthode de Fellenius.



5.4.2. Méthode de Bishop rigoureuse

La première méthode rigoureuse capable d'analyser des surfaces de rupture circulaires pour des pentes dans des sols frottants et cohérents a été proposée par Bishop (1955). La méthode satisfait complètement les équations d'équilibre et fournit un moyen d'évaluer la validité de toute solution qui pourrait être proposée.

Dans cette méthode rigoureuse, les forces entre tranches sont prises en compte dans l'expression de la force effective normale agissant sur la base de la tranche.

En écrivant, selon la Figure 318, l'équilibre des forces agissant sur une tranche selon la direction verticale, on obtient :

$$\Delta W + \Delta X - \Delta S_r \cdot \sin \alpha - \Delta N' \cdot \cos \alpha = 0 \quad (15)$$

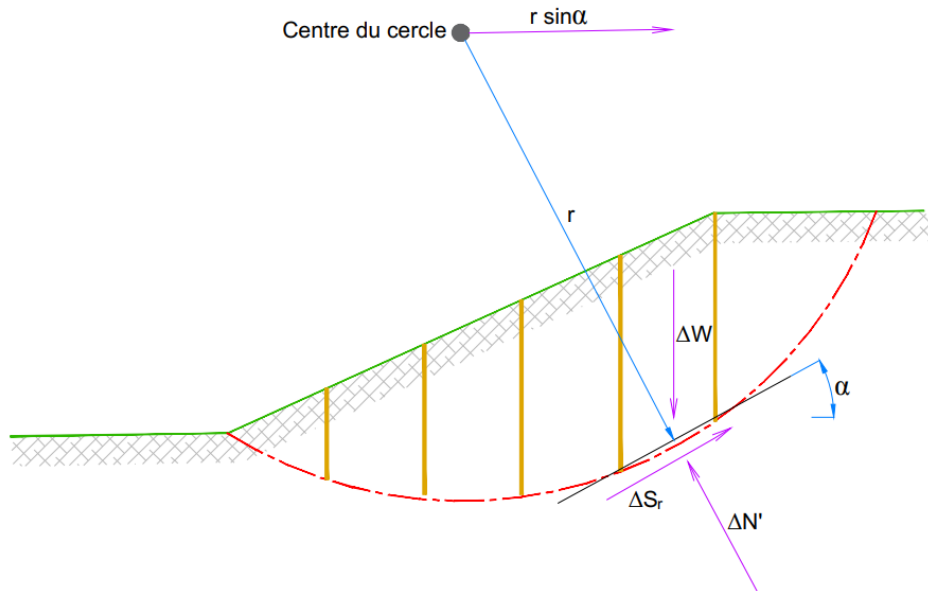


Figure 150 : forces considérées pour la méthode ordinaire des tranches

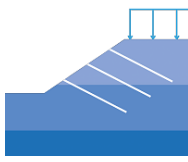
ΔX étant la différence entre les deux forces de cisaillement agissant sur les faces latérales verticales de la tranche.

En substituant l'expression de la résistance au cisaillement de l'équation (9) dans l'équation (15) de l'équilibre des forces selon la verticale et en exprimant la force normale effective, on obtient :

$$\Delta W + \Delta X - \frac{(\Delta C'_\alpha + \Delta N' \tan \phi'_\alpha)}{F} \cdot \sin \alpha - \Delta N' \cdot \cos \alpha = 0$$

$$\Delta W + \Delta X - \Delta C'_\alpha \cdot \frac{\sin \alpha}{F} - \Delta N' \cdot \cos \alpha \cdot \left(1 + \tan \phi'_\alpha \cdot \frac{\tan \alpha}{F}\right) = 0$$

$$\Delta N' = \frac{\Delta W + \Delta X - \Delta C'_\alpha \cdot \frac{\sin \alpha}{F}}{\cos \alpha \cdot \left(1 + \tan \phi'_\alpha \cdot \frac{\tan \alpha}{f}\right)} \quad (16)$$



En substituant cette expression dans l'équation (8) d'équilibre général des moments, on obtient pour F :

$$F = \frac{\sum_1^n \Delta C'_a \cdot \cos \alpha + (\Delta W + \Delta X) \cdot \tan \phi'_a}{\sum_1^n \Delta W \cdot \sin \alpha} \quad (17)$$

Si l'équilibre interne est satisfait, les forces internes doivent satisfaire les conditions aux limites suivantes :

$$\sum_1^n \Delta X = X_0 - X_n \quad (18a)$$

$$\sum_1^n \Delta E' = E'_0 - E'_n \quad (18b)$$

Avec :

- $\Delta E'$, la différence entre les deux forces effectives normales agissant sur les faces latérales verticales de chaque tranche et, selon la Figure 5 :

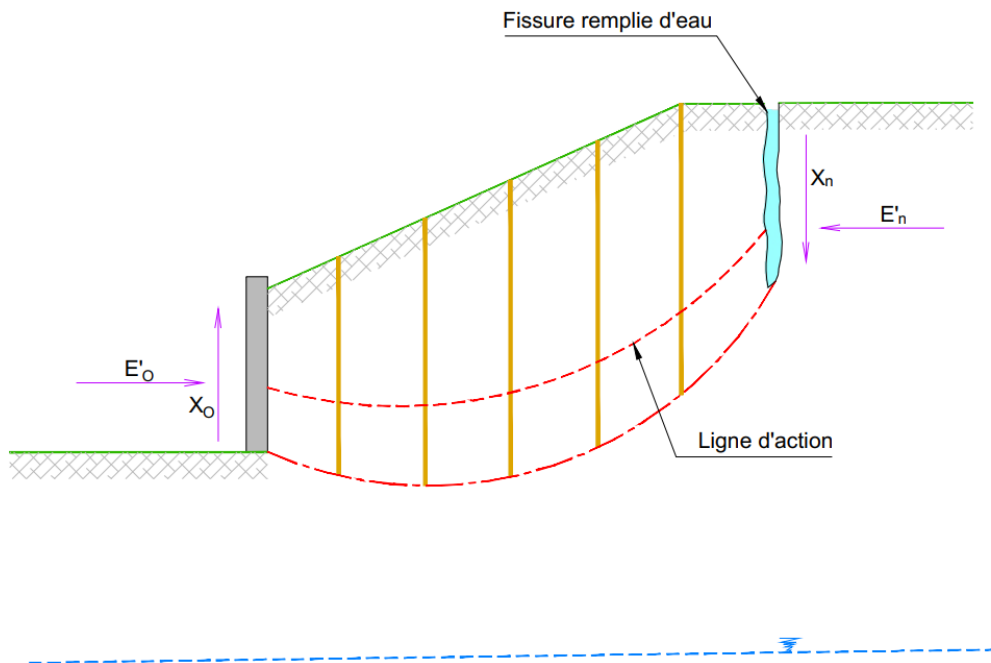


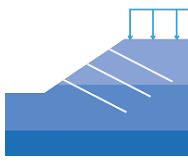
Figure 151 : forces agissant sur les tranches d'extrémité

- X_0, E'_0 la force de cisaillement et la force normale effectives agissant sur la frontière gauche de la masse en glissement
- X_n, E'_n la force de cisaillement et la force normale effectives agissant sur la frontière droite de la masse en glissement.

Selon la Figure 317, en sommant les forces parallèles à la base de chaque tranche, l'équation d'équilibre des forces dans une direction indépendante de la direction verticale utilisée précédemment est obtenue :

$$(\Delta W + \Delta X) \cdot \sin \alpha + \Delta E' \cdot \cos \alpha - \Delta S_r = 0$$

$$\Delta E' = \frac{\Delta S_r}{\cos \alpha} - (\Delta W + \Delta X) \cdot \tan \alpha \quad (19)$$



Puis en sommant pour toutes les tranches :

$$\sum_1^n \Delta E' = \sum_1^n \left[\frac{\Delta S_r}{\cos \alpha} - (\Delta W + \Delta X) \cdot \tan \alpha \right]$$

Et avec la condition exprimée dans l'équation (18b) :

$$\sum_1^n \left[\frac{\Delta S_r}{\cos \alpha} - (\Delta W + \Delta X) \cdot \tan \alpha \right] = E'_0 - E'_n \quad (20)$$

Si des valeurs de ΔX satisfont simultanément aux expressions (17), (18a) et (20), alors, pour chaque tranche, l'équilibre des forces verticales et celui des forces dans une autre direction est assuré et, pour l'ensemble, l'équilibre général des moments est satisfait.

L'équilibre des moments des tranches prises individuellement n'a pas été considéré pour arriver à l'expression du coefficient de sécurité donnée dans l'expression (17).

L'utilisation de n-1 équations d'équilibre des moments des tranches prises individuellement permet de déterminer la position de la ligne de poussée, lieu d'application des forces E' tel que défini sur la Figure 317.

Etant donné que l'équilibre global des moments a été considéré, une équation d'équilibre des moments d'une tranche individuelle est surabondante et non utilisée.

Une hypothèse doit être faite quant à la position des forces effectives normales, ΔN , situées à la base de chaque tranche dans le but d'établir d'équation d'équilibre des moments pour chaque tranche.

Bishop (1955) a fait l'hypothèse que $\Delta N'$ est située au centre de la base de chaque tranche.

Le poids de chaque tranche, ΔW , lui aussi a été pris au centre de la tranche pour l'expression de l'équilibre des moments, ce qui apparaît implicitement dans l'équilibre global des moments de l'expression (3).

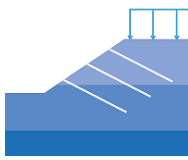
Si, selon la Figure 317, la somme des moments est faite par rapport au point médian de la base de chaque tranche, alors la contribution du poids, ΔW , et celle de la force normale effective, $\Delta N'$, disparaissent dans l'équation des moments et l'équation d'équilibre devient :

$$E' \left[(y'_t - Y) - \frac{\Delta y}{2} \right] - (E' + \Delta E') \cdot \left[(y'_t + \Delta y'_t) - (y + \Delta y) + \frac{\Delta y}{2} \right] + X \cdot \frac{\Delta x}{2} + (X + \Delta X) \cdot \frac{\Delta x}{2} = 0 \quad (21)$$

Avec :

- Δx , la largeur de la tranche
- Δy et $\Delta y'_t$, les changements incrémentaux au travers de la largeur de la tranche des fonctions définissant respectivement la surface de glissement $y(x)$ et la ligne de poussée effective $y'_t(x)$

En résolvant par rapport à la ligne de poussée effective, l'expression suivante est obtenue :



Le calcul de la position de la ligne de poussée effective est effectué successivement, tranche après tranche.

$$(y'_t + \Delta y'_t) = \frac{E' \cdot y'_t \cdot \Delta E' \left(y + \frac{\Delta y}{2} \right) + X \cdot \Delta x + \Delta X \cdot \frac{\Delta x}{2}}{E' + \Delta E'} \quad (22)$$

Pour la première tranche, l'effort de cisaillement X et la force normale effective E' sont respectivement les forces X_o et E'_o données par les conditions aux limites. La position de la ligne de poussée effective sur le côté gauche de la première tranche, y'_t , coïncide avec la force E'_o . Si E'_o n'existe pas, y'_t est situé à la base de la surface de glissement de la première tranche.

Les valeurs calculées de $X + \Delta X$, $E' + \Delta E'$ et $y'_t + \Delta y'_t$ deviennent les valeurs X , E' et y'_t pour la tranche suivante. Le procédé est répété pour toutes les tranches. La valeur de $\Delta E'$ de chaque tranche est calculée à partir de l'expression (19).

La position de la ligne de poussée permet d'apprécier si la solution est acceptable. Il y a un nombre infini de choix pour les valeurs de ΔX qui vont satisfaire pleinement l'équilibre. Si le choix fait conduit à une solution qui a une ligne de poussée entièrement située dans la masse en glissement, ce qui implique sans zones de tension du sol, alors la solution devrait être acceptable.

Un autre critère servant à déterminer si une solution qui satisfait pleinement les conditions d'équilibre est raisonnable ou pas est la présence ou non de contraintes de cisaillement élevées entre tranches.

La solution ne sera pas acceptable si la contrainte de cisaillement entre tranches dépasse la résistance au cisaillement du sol le long de la surface verticale de contact.

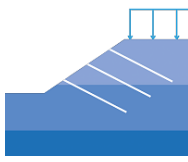
La conformité à cette condition n'est généralement pas suffisante. La contrainte de cisaillement critique se produit généralement selon un plan incliné (Seed et Sultan, 1967). Si la résistance au cisaillement mobilisée le long d'un plan vertical est nettement en dessous de la résistance mobilisable selon ce plan, on peut supposer que la solution est adéquate (Whitman et Bailey, 1967).

Bishop (1955) a trouvé que, bien qu'une infinité de valeurs de ΔX satisfasse à l'ensemble des conditions d'équilibre, la variation des valeurs du coefficient de sécurité est insignifiante. Ainsi, la vérification de la position de la ligne de poussée ou du cisaillement entre tranches n'est pas toujours justifiée étant donné la quantité de travail requis pour satisfaire ces critères en tout point.

5.4.3. Méthode de Bishop modifiée étendue : Méthode de Carter

Les méthodes exposées précédemment sont applicables à des surfaces de rupture circulaires. Dans le cas de surfaces de rupture de forme quelconque, la méthode de Carter (1971) est utilisée. Cette méthode possède l'avantage de s'appliquer à toutes les surfaces de rupture, y compris aux surfaces planes.

Carter a démontré que, dans le cas où il est fait l'hypothèse que $\Delta X = 0$ dans la Figure 317, la valeur du facteur de sécurité, déterminée en satisfaisant l'équilibre global des moments et l'équilibre des forces verticales appliquées



aux tranches individuelles, variait suivant la position du point par rapport auquel l'équilibre global des moments était satisfait.

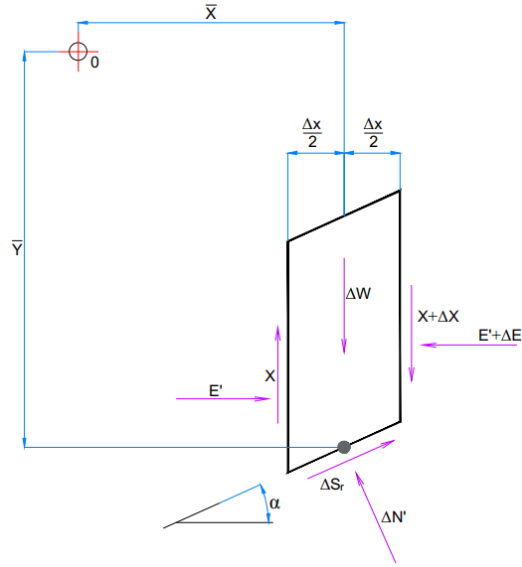


Figure 152 : forces dans une tranche par rapport à un point arbitraire

Selon la Figure 6, en sommant les moments par rapport à un point arbitraire O, l'expression suivante de l'équilibre des moments est obtenue :

$$\sum_1^n [\Delta N'(\bar{y} \sin \alpha - \bar{x} \cos \alpha) + W\bar{x} - \Delta S_r (\bar{x} \sin \alpha + \bar{y} \cos \alpha)] = 0 \quad (23)$$

Avec $\bar{x}$ et $\bar{y}$ les distances horizontale et verticale entre le point O et le point médian de la base de chaque tranche.

L'expression de la force de cisaillement résistante de l'expression (9) est ensuite remplacée dans l'expression (23) et $\Delta N'$ est substitué par sa valeur donnée dans l'expression (16).

Après arrangement, simplification et transposition du terme ΔX , l'expression suivante contenant n+1 inconnues (F et n valeurs de ΔX) est obtenue :

$$\sum_1^n \bar{y} \frac{\frac{C'_a}{\cos \alpha} + \Delta W \cdot (\tan \alpha - F \cdot \tan \alpha)}{F + \tan \alpha \cdot \tan \phi'_a} = \sum_1^n \bar{y} \Delta X \left[\frac{F \cdot \tan \alpha - \tan \phi'_a}{F + \tan \alpha \cdot \tan \phi'_a} - \frac{\bar{x}}{\bar{y}} \right] \quad (24)$$

Si l'hypothèse $\Delta X=0$ est faite, l'expression (24) est réduite à l'expression suivante :

$$\sum_1^n \bar{y} \frac{\frac{\Delta C'_a}{\cos \alpha} + \Delta W \cdot (\tan \phi'_a - F \cdot \tan \alpha)}{F + \tan \alpha \cdot \tan \phi'_a} = 0 \quad (25)$$

Le facteur de sécurité est exprimé de façon implicite.

Bien que cette valeur soit indépendante de la position horizontale du point par rapport auquel l'équilibre des moments est réalisé, elle dépend de la position verticale de ce point.

Carter (1971) a montré que quand $\bar{y}$ tend vers l'infini, la valeur du facteur de sécurité tend vers une valeur asymptotique minimum.

Lorsque $\bar{y}$ tend vers l'infini, $\bar{y}$ est retiré de l'expression (25) et l'égalité devient :

$$\sum_1^n \frac{\frac{\Delta C'_a}{\cos \alpha} + \Delta W. (\tan \phi'_a - F. \tan \alpha)}{F + \tan \alpha. \tan \phi'_a} = 0 \quad (26)$$

Cette expression satisfait l'équilibre des forces dans la direction verticale pour chaque tranche et l'équilibre horizontal global. Il ne satisfait pas l'équilibre des moments des tranches individuelles.

La valeur du facteur de sécurité est conservatrice par rapport à des solutions raisonnables obtenues par des méthodes plus précises qui satisfont entièrement aux conditions d'équilibre.

Le développement complet de la méthode avec prise en compte de l'ensemble des forces généralement rencontrées dans les problèmes de stabilité de pentes est donné dans l'Annexe E. Les forces considérées pour l'analyse sont indiquées sur la Figure 321.

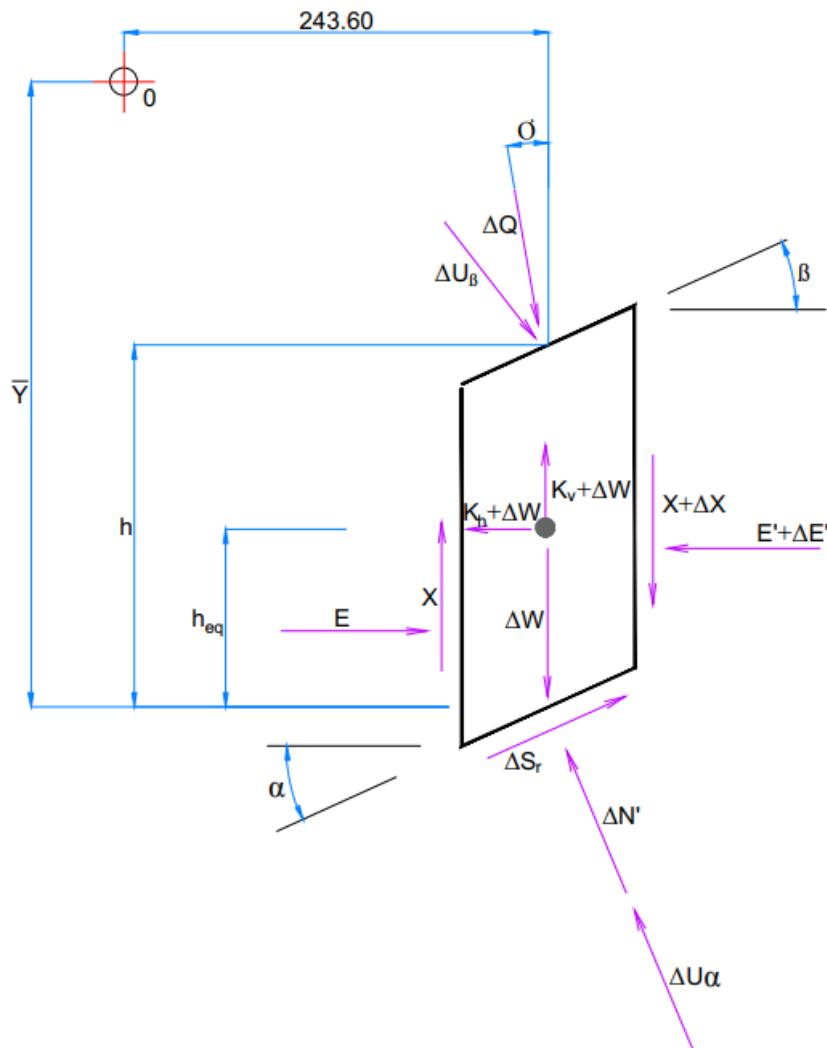
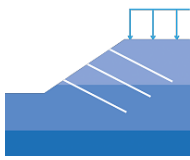


Figure 153 : forces prises en compte pour la modélisation numérique

Lorsque la coordonnée y du point par rapport auquel est effectué l'équilibre général des moments tend vers l'infini, l'expression finale du développement devient :

$$\sum_1^n \frac{A_1 - F.A_2}{F + A_3} = 0$$



Dans le logiciel, les surfaces non circulaires sont calculées avec la méthode de Carter en tenant compte du bras de levier y du point par rapport auquel on écrit l'équilibre des moments. L'utilisateur a néanmoins la possibilité s'il le désire de ne pas tenir compte du bras de levier : c'est la différence entre la méthode de CARTER étendue et la méthode de CARTER simplifiée.

Les expressions A1, A2 et A3 étant :

$$A_1 = \frac{C'_a}{\cos\alpha} + \tan\phi'_a \cdot [W \cdot (1 - k_v - k_h \cdot \tan\alpha) - \frac{U_\alpha}{\cos\alpha} + U_\beta \cdot (\cos\beta + \tan\alpha \cdot \sin\beta) + Q \cdot (\cos\delta + \tan\alpha \cdot \sin\delta)]$$

$$A_2 = W \cdot [(1 - k_v) \cdot \tan\alpha + k_h] + U_\beta \cdot (\tan\alpha \cdot \cos\beta - \sin\beta) + Q \cdot (\tan\alpha \cdot \cos\delta - \sin\delta)$$

$$A_3 = \tan\alpha \cdot \tan\phi'_a$$

Avec :

- k_h , coefficient sismique horizontal
- k_v , coefficient sismique vertical
- U_α , la résultante de la poussée de l'eau agissant à la base de la tranche
- U_β , la résultante de la poussée de l'eau agissant au sommet de la tranche
- Q , la résultante de la surcharge superficielle agissant sur la tranchée
- β , l'inclinaison de la face supérieure de la tranche
- α , l'inclinaison de la face inférieure de la tranche
- δ , l'inclinaison de la résultante Q

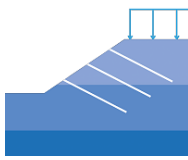
5.5. Méthode des perturbations

5.5.1. Principe

Dans la plupart des cas, la modélisation impose de décomposer la surface de glissement selon des tranches. Quelle que soit la méthode considérée (Bishop pour les surfaces de ruptures circulaires ou Carter pour les surfaces non-circulaires), il réside que les inconnues pour une tranche de sol donnée, sont la contrainte normale sous la base de la tranche, ainsi que la contrainte tangentielle à la base de la tranche ; ces contraintes correspondant, en réalité, aux efforts liant le volume en glissement et le volume "fixe".

D'autre part, la discrétisation en tranches laisse des inconnues supplémentaires, liées aux efforts inter-tranches, et la plupart des méthodes émettent des hypothèses sur ces efforts.

La méthode des perturbations, élaborée au L.C.P.C. par MM. RAULIN, ROUQUES et TOUBOL (1974), permet de corriger la contrainte normale σ_0 calculée par une méthode simple et approximative. Pour cela, un coefficient perturbateur de la forme $(\lambda + \mu\nu)$ est réintroduit au niveau de la contrainte normale, dans les équations d'équilibre, afin d'estimer la manière dont réagit le système à la perturbation entrée. Il s'agit de la seule méthode permettant de vérifier les 3 équations de base (équilibre horizontal, vertical et des moments) tranche par tranche, et donc d'optimiser la vérification de la stabilité des pentes. Elle s'applique au calcul des surfaces circulaires ou non.



5.5.2. Mise en équations

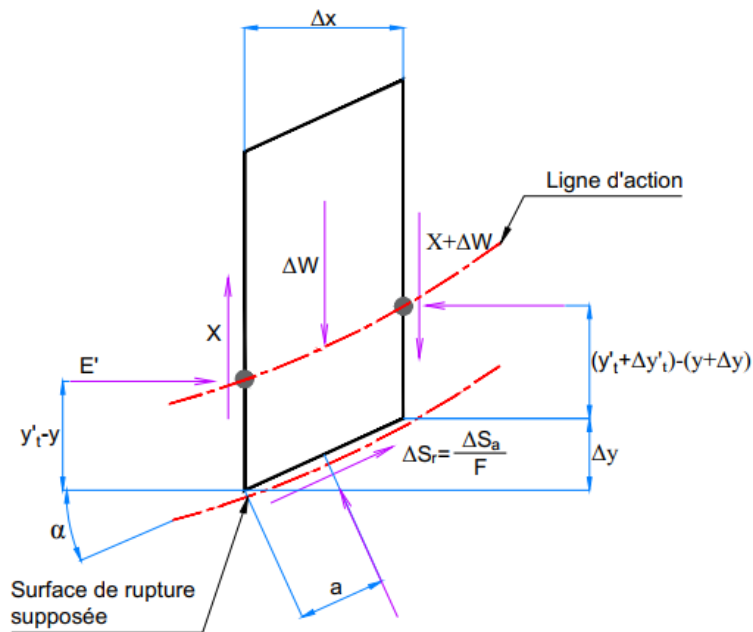


Figure 154 : forces agissant sur une tranche

La méthode des perturbations impose que l'équilibre de chaque tranche soit assuré horizontalement, verticalement et au niveau des moments par rapport à n'importe quel point, ce qui donne, en sommant sur les tranches :

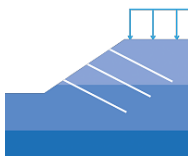
- efforts horizontaux : $\int \Delta W - \int \Delta N \cdot \cos \alpha - \int \Delta S_r \cdot \sin \alpha + \int \Delta X = 0$
- efforts verticaux : $\int \Delta E' - \int \Delta N \cdot \sin \alpha - \int \Delta S_r \cdot \cos \alpha + \int \Delta U = 0$
- moments au point O : $\int x \cdot (\Delta W - \Delta N \cdot \cos \alpha - \Delta S_r \cdot \sin \alpha + \Delta X) + \int y \cdot (\Delta E' - \Delta N \cdot \sin \alpha - \Delta S_r \cdot \cos \alpha + \Delta U) = 0$

Avec :

- ΔW : poids de la tranche de sol
- $\Delta N = \sigma_0 \cdot (\lambda + \mu \nu) (\Delta x / \cos \alpha)$: effort dû à la contrainte normale sous la base de la tranche
- α : angle entre la base de la tranche et l'horizontale
- Δx : épaisseur de la tranche
- $\Delta S_r : (\Delta N \cdot \tan \phi + c) / \Gamma$: effort résistant dû à la contrainte tangentielle sous la base de la tranche
- ϕ : angle de frottement interne à la base de la tranche
- c : cohésion à la base de la tranche
- Γ : facteur de sécurité vis-à-vis de la stabilité
- ΔX : efforts verticaux inter-tranches
- $\Delta E'$: efforts horizontaux inter-tranches
- ΔU : efforts horizontaux dus à l'eau, permettant de modéliser les écoulements

Le théorème de transport des moments permet de choisir n'importe quel point pour la détermination du moment, puisque le raisonnement impose que la force transportée soit nulle, par l'écriture des efforts horizontaux et verticaux.

En isolant λ et μ dans les équations précédentes, on obtient un système d'équations linéaire en λ et μ .



$$\begin{pmatrix} H1 + \frac{H2}{\Gamma} & H3 + \frac{H4}{\Gamma} & H5 + \frac{H6}{\Gamma} \\ V1 + \frac{V2}{\Gamma} & V3 + \frac{V4}{\Gamma} & V5 + \frac{V6}{\Gamma} \\ O1 + \frac{O2}{\Gamma} & O3 + \frac{O4}{\Gamma} & O5 + \frac{O6}{\Gamma} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \lambda \\ \mu \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

Ce système admet une solution non triviale si le déterminant de la matrice contenant Γ est nul, ce qui donne une équation de degré 3 aisée à résoudre avec les méthodes classiques (méthode de Cardan, par exemple).

5.5.3. Choix du σ_0 et v

A l'origine, le choix s'était porté sur un couple $(\sigma_0 ; v)$ égal à $(\Delta W \cdot \cos 2\alpha ; \tan \alpha)$; σ_0 était alors égale à la contrainte de Fellenius. Cependant, la contrainte calculée ainsi étant assez éloignée de la contrainte réelle dans le sol, le coefficient de perturbation n'est alors pas suffisant pour retrouver la contrainte réelle. Cette réserve est encore plus importante lorsque des efforts extérieurs sont appliqués sur la tranche (surcharge, ...).

Après recherches, il est apparu que le choix optimal pour σ_0 et v était :

$$\sigma_0 = \frac{\left(\frac{\Delta W + F_v}{dx}\right) + c \cdot \cot \varphi}{1 + \sin \varphi \cdot \cos\left(2\alpha - \varphi - \frac{\pi}{2}\right)} \cdot \cos^2 \varphi - c \cdot \cot \varphi - \frac{(dU + F_h)}{dx}$$

$$v = \tan \alpha$$

L'expression de σ_0 provient du calcul trigonométrique dans le cercle de Mohr, en supposant que la contrainte n'est pas une contrainte principale.

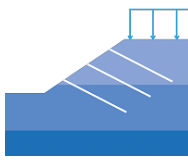
La prise en compte d'une contrainte initiale de cette forme permet :

- d'affiner la contrainte calculée initialement, puisqu'elle représente l'état réel de contraintes dans le sol ;
- de mieux prendre en compte l'augmentation de la contrainte dans le sol dû aux efforts extérieurs verticaux (F_v) comme horizontaux (F_h) (surcharges, ancrages, ...).

5.6. Modélisation

5.6.1. Coefficients de sécurité partiels

Le programme permet d'effectuer les calculs selon la méthode traditionnelle avec un coefficient de sécurité global ou selon les méthodes des coefficients de sécurité partiels selon les recommandations des Eurocodes 7 (NF P 94-270) et CLOUTERRE (coefficients pondérateurs sur les actions et sur la méthode et des coefficients de sécurité partiels sur certains paramètres de résistance des matériaux).



5.6.1.1. Recommandations CLOUTERRE

Les valeurs des coefficients pondérateurs sur les actions et sur la méthode des recommandations CLOUTERRE 91 sont données dans l'Annexe C en fonction de la nature des actions pour les combinaisons fondamentales et accidentelles pour des ouvrages courants et sensibles.

La formulation du facteur de sécurité global selon la méthode de Fellenius telle que donnée dans l'équation (11) est :

$$F = \frac{\sum_1^n (\Delta C'_a + \Delta W \cdot \cos \alpha \cdot \tan \phi'_a)}{\sum_1^n \Delta W \cdot \sin \alpha}$$

Selon la formulation aux E.L.U., l'expression devient :

$$\Gamma_{Fell} = \frac{\sum_1^n \left(\frac{\Delta C'_a}{\Gamma_{c'}} + \Gamma_{s1} \cdot \Delta W \cdot \cos \alpha \cdot \frac{\tan \phi'_a}{\Gamma_{\phi'}} \right)}{\Gamma_{s3} \cdot \sum_1^n \Gamma_{s1} \cdot \Delta W \cdot \sin \alpha} \quad (28)$$

De même, la formulation du facteur de sécurité global selon la méthode de Bishop modifiée donnée dans l'équation (14) :

$$F = \frac{\sum_1^n \left[\frac{(\Delta C'_a \cdot \cos \alpha + \Delta W \cdot \tan \phi'_a)}{\cos \alpha \cdot \left(1 + \frac{\tan \phi'_a \cdot \tan \alpha}{F} \right)} \right]}{\sum_1^n \Delta W \cdot \sin \alpha}$$

devient, quand elle est exprimée selon la formulation aux E.L.U. :

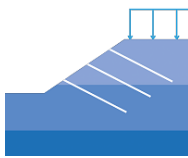
$$\Gamma_{Bish} = \frac{\sum_1^n \left[\frac{\left(\frac{\Delta C'_a}{\Gamma_{c'}} + \Gamma_{s1} \cdot \Delta W \cdot \frac{\tan \phi'_a}{\Gamma_{\phi'}} \right)}{\cos \alpha \cdot \left(1 + \frac{\tan \phi'_a \cdot \tan \alpha}{\Gamma_{\phi'} \cdot \Gamma_{Bish} \cdot \Gamma_{s3}} \right)} \right]}{\Gamma_{s3} \cdot \sum_1^n \Gamma_{s1} \cdot \Delta W \cdot \sin \alpha} \quad (29)$$

5.6.1.2. Eurocodes 7

Les vérifications aux états limites sont calculées avec les combinaisons d'actions proposées par de la norme NF EN 1997-1 et la Norme d'application française NF 94 270. Les coefficients partiels pour le calcul des ouvrages en remblai renforcé et des massifs en sol cloué sont donnés dans l'Annexe C en fonction des différentes approches.

Les vérifications minimales à effectuer aux états limites ultimes pour les situations de projet durables ou transitoires sont données dans le tableau ci-dessous :

		ELU type	Approche
Justification de la géométrie du massif			
Stabilité externe	Glissement sur sol support	GEO	2



	Poinçonnement du sol support	GEO	2
Stabilité Générale		GEO	3
Justification de la distribution des renforcements et du parement			
Stabilité interne	Résistance en traction	STR	2
	Résistance d'interaction	STR	2
	Résistance du parement	STR	2
Stabilité mixte		GEO	3

Tableau 4 : vérifications minimales à effectuer aux états limites ultimes pour les projets durables ou transitoires

La vérification de la stabilité mixte d'un ouvrage en sol renforcé concerne les lignes de rupture potentielle par grand glissement qui interceptent et/ou longent au moins un des lits de renforcement. Elle doit prendre en compte la contribution de ces renforcements et de leurs dispositifs de liaison au parement.

5.6.2. Paramètres de sol

Chaque sol est décrit par les paramètres isotropes suivants :

Le poids volumique apparent humide, le poids volumique saturé et les paramètres de résistance c et ϕ de l'enveloppe de Mohr-Coulomb et le frottement latéral unitaire limite entre le sol et les inclusions.

Le poids volumique apparent humide et le poids volumique saturé sont des poids totaux et les deux sont utilisés pour permettre au programme la prise en compte des zones traversées par un niveau d'eau.

Dans le cas où le sol est entièrement situé au-dessus du niveau d'eau, le poids volumique saturé n'est pas utilisé mais une valeur de poids volumique doit être néanmoins introduite. N'importe quelle valeur, y compris zéro est acceptée par le programme.

De la même manière pour le cas où la zone de sol est entièrement submergée, le poids apparent humide ne sera pas utilisé. A nouveau, une valeur doit cependant être introduite pour ce paramètre.

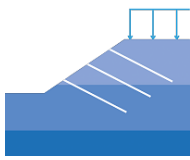
Des analyses en contraintes effectives ou en contraintes totales peuvent être effectuées en utilisant les paramètres de résistance de Mohr-Coulomb appropriés, à savoir (c' , ϕ') pour les analyses en contraintes effectives et (c_u , ϕ_u) pour les analyses en contraintes totales.

En cas de calcul sous séisme en pseudo-statique, les paramètres de sol adéquats doivent être pris en compte : les paramètres (c_u , ϕ_u) sont généralement adoptés conformément aux recommandations du paragraphe 9.24 de l'AFPS 90.

5.6.3. Prise en compte de l'eau

Il y a cinq différentes manières de prendre en compte les pressions interstitielles :

(1) En définissant point par point un niveau de nappe tel que décrit sur la figure 323 ci-dessous. Le niveau de la nappe est schématisé par une série de points reliés les uns aux autres par des segments de droite. Il est



recommandé d'étendre latéralement la définition du niveau de la nappe jusqu'aux limites latérales des couches de sol.

La ligne du niveau de la nappe peut se trouver soit au-dessus de la surface du terrain, soit au-dessous; elle peut aussi coïncider avec la surface du terrain. Ceci permet non seulement de définir un niveau de nappe souterraine mais aussi des surfaces d'écoulement ainsi que des masses d'eau au repos telles que des lacs ou des cours d'eau.

La pression interstitielle en chaque point sous la surface de la nappe est calculée à partir de la charge qui est la distance verticale entre le point en question et le niveau d'eau. S'il y a un gradient, cette hypothèse est généralement sécuritaire. Cependant, dans la zone d'un écoulement, cette hypothèse n'est pas du côté de la sécurité. La présence de pressions artésiennes à l'intérieur d'un sol constitué de couches hétérogènes complique davantage la validité de l'hypothèse. Etant donné que l'erreur peut être importante pour certains types d'écoulement, certaines méthodes de prise en compte des pressions interstitielles sont plus appropriées. Ces méthodes sont décrites ci-après.

Lorsque la surface de l'eau est située au-dessus de la surface du terrain, il est fait l'hypothèse que des pressions hydrostatiques sont appliquées à la surface du sol.

(2) La pression interstitielle peut être reliée au coefficient de pression interstitielle, r_u , tel que défini sur la figure 324, r_u étant le rapport entre la pression interstitielle et la contrainte verticale totale. La contrainte verticale totale ne prend pas en compte les surcharges appliquées à la surface du sol.

(3) La pression interstitielle peut être exprimée sous la forme d'une pression constante, U , en n'importe quel point à l'intérieur d'un sol donné.

(4) La pression interstitielle peut être définie point par point dans un semis de point pouvant résulter d'un calcul type différences finies ou éléments finis.

Les options sous (2), (3) et (4) peuvent être utilisées indépendamment ou de façon combinée, avec ou sans l'option d'un niveau d'eau tel que décrit sous (1).

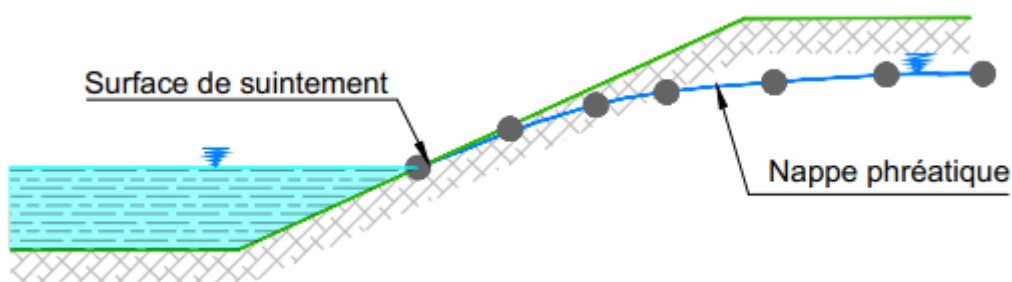


Figure 155 : définition de la nappe sur la totalité des abscisses.

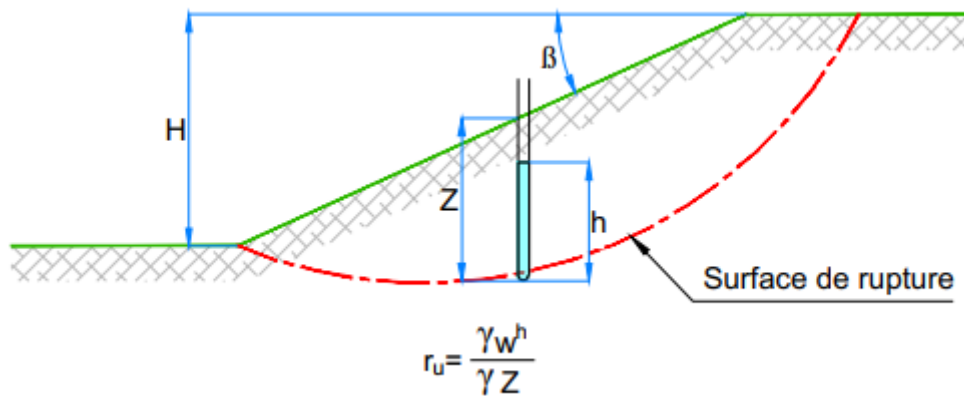
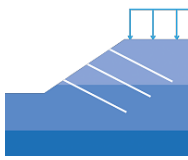


Figure 156 : définition du coefficient r_u .

5.6.4. Prise en compte des inclusions

5.6.4.1. Type d'inclusions

Plusieurs types d'inclusions peuvent être pris en compte par le programme GeoStab. Ces inclusions sont schématisées sur la Figure 325. Elles comprennent :

- les clous ou épingles d'une paroi clouée (1)
- les tirants (2) d'un soutènement constitué d'un rideau de palplanches ou de pieux (3)
- une nappe de géotextile (4) à l'interface entre une couche compressible et un remblai
- des colonnes de gravier (5) pour améliorer les caractéristiques de compressibilité et de résistance de couches de mauvaise qualité
- des micropieux (6) pour l'épingle de surfaces de rupture

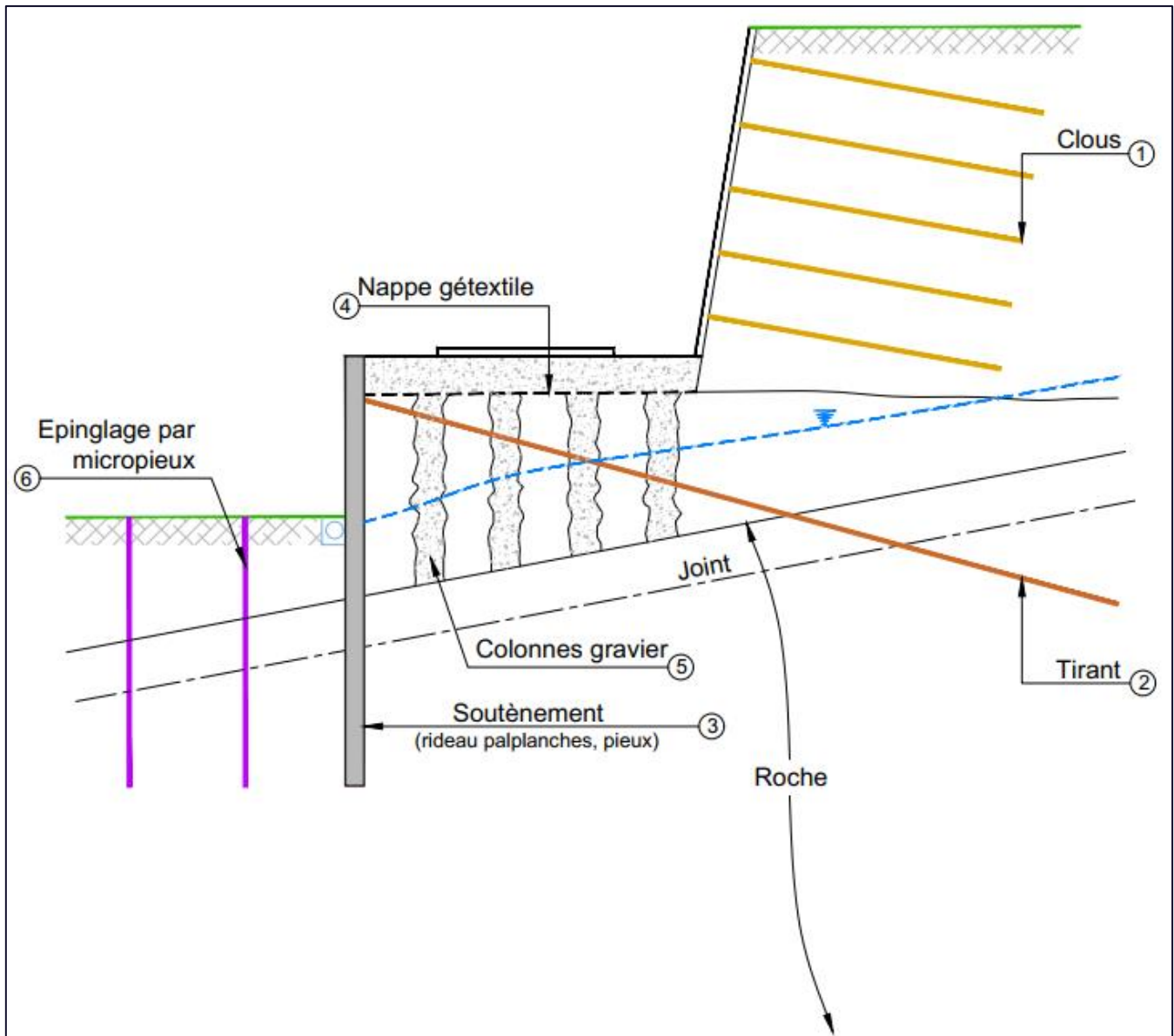
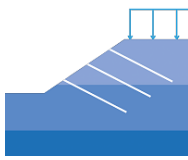


Figure 157 : types d'inclusions prises en compte par GeoStab.

5.6.4.2. Sollicitation d'une inclusion, influence sur la stabilité

Le comportement d'une inclusion qui est travers e par une surface de rupture a été décrit par Blondeau, Christiansen, Guilloux et Schlosser (1984). L'interaction entre le sol et l'inclusion est décrite sur la Figure 326.

Les efforts dans l'inclusion sont :

- T_n , l'effort normal dans l'axe de l'inclusion qui engendre de la traction ou de la compression
- T_c , l'effort tranchant perpendiculaire à l'axe de l'inclusion qui engendre du cisaillement
- M , le moment de flexion dans l'inclusion

Il est admis que l'inclusion se comporte comme une poutre sur appuis élastiques et que sa d form e est symétrique par rapport à la surface de rupture.

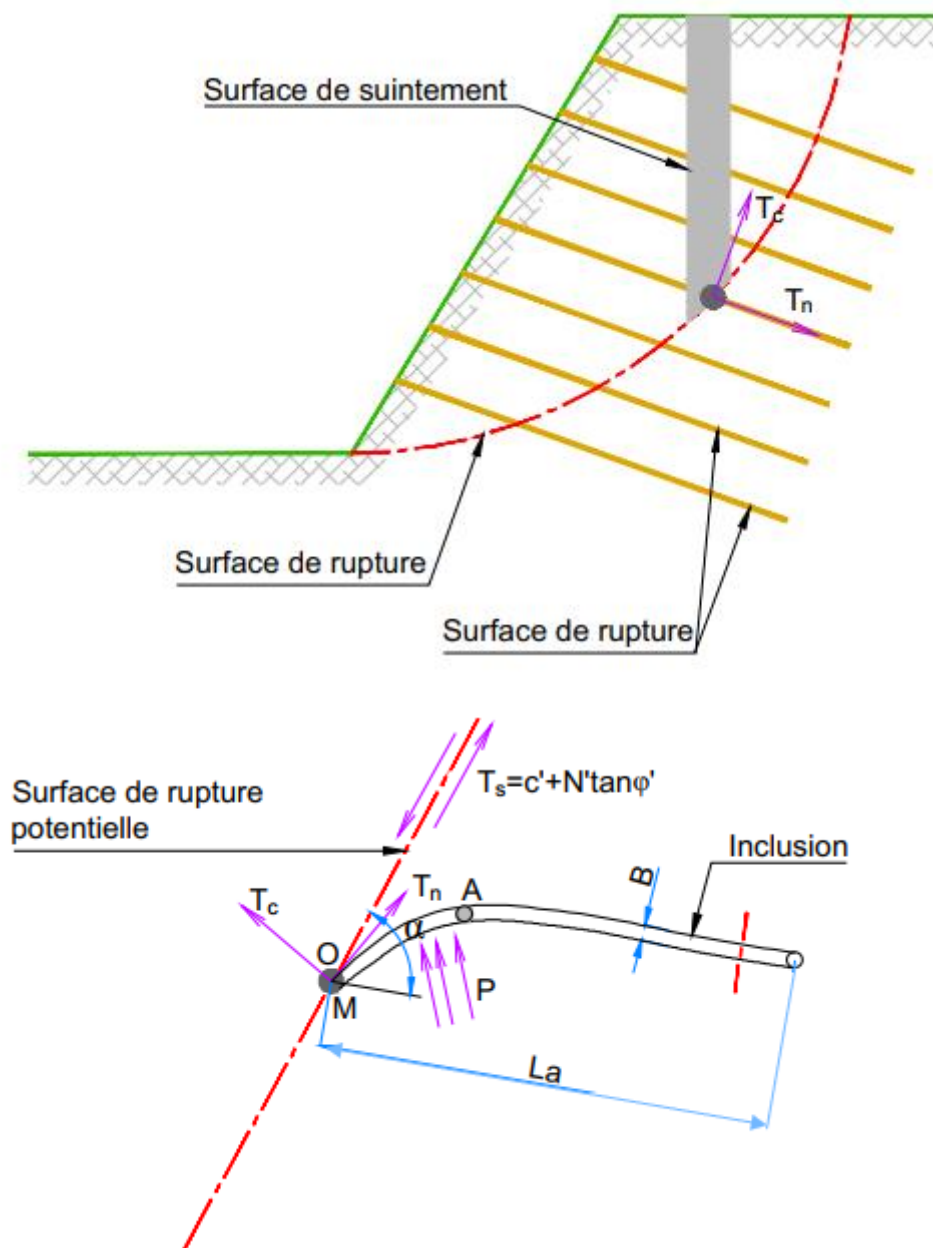
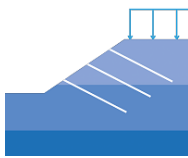
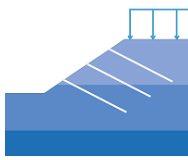


Figure 158 : interaction sol / inclusion.

Deux points sont considérés pour les conditions extrêmes des efforts :

Au point O, intersection avec la surface de rupture, le moment de flexion est nul et l'effort de cisaillement dans l'inclusion est maximum. Au point A de courbure maximum, le moment de flexion dans l'inclusion est maximum et l'effort de cisaillement est nul.

Pour tenir compte des inclusions dans les calculs de stabilité par les différentes méthodes (Fellenius, Bishop, Carter), il faut introduire dans les équations d'équilibre statique, les efforts mobilisables dans les inclusions au point d'intersection entre l'inclusion et la surface potentielle de rupture considérée. Ces efforts doivent être



compatibles avec la résistance propre du matériau constituant l'inclusion et les efforts d'interaction entre l'inclusion et le sol qui l'entoure. ⁽¹⁾

La résistance propre du matériau de l'inclusion ne doit pas être dépassée au point O où les efforts T_c et T_n sont maximums et au point A où le moment de flexion M dans l'inclusion est maximum. De plus, les efforts T_c , T_n et M ne peuvent être supérieurs aux efforts limites qui peuvent être développés dans l'interaction entre l'inclusion et le sol à savoir :

- Pour l'effort T_n , l'effort d'arrachage de l'inclusion qui est égal à l'adhérence sol-inclusion sur la longueur L_a située entre la surface potentielle de rupture et l'extrémité de l'inclusion.
- Pour les efforts T_c et M , une pression de contact sol-inclusion qui ne peut dépasser la pression limite du sol, p_i , telle qu'elle peut être déterminée au pressiomètre par exemple.

La représentation graphique du critère global de rupture sol-inclusion est donnée sur la Figure 327. Ce critère établit la surface enveloppe inférieure des trois surfaces correspondant aux critères de rupture énoncés précédemment (résistance propre de l'inclusion, interaction par pression de contact, interaction par frottement latéral). Chacun de ces critères est analysé ci-dessous.

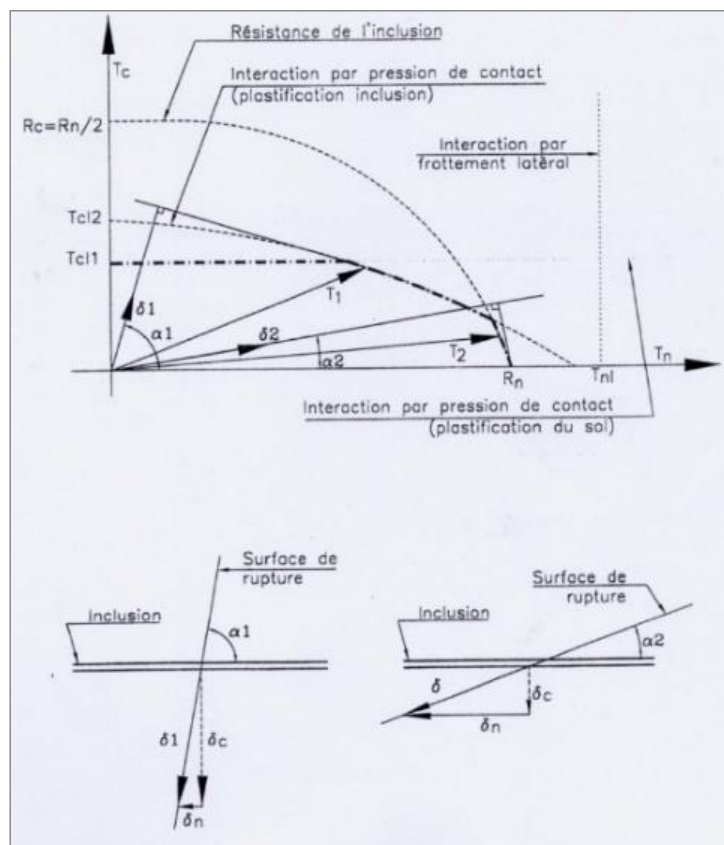
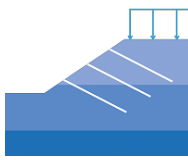


Figure 159 : représentation graphique du critère global de rupture sol-inclusion

¹ L'approche modélisée dans GeoStab est celle proposée par Blondeau, Christiansen, Guilloix et Schlosser (1984). Cependant l'attention de l'utilisateur est attirée sur le fait que la prise en compte selon cette approche a été largement mise en cause, notamment par Bridle (1989), Jewell & Pedley (1990) et Bridle (1990).



5.6.4.3. Résistance propre de l'inclusion

L'état de contraintes limite pour les conditions de résistance propre de l'inclusion est indiqué sur la Figure 328. Il est fait l'hypothèse d'une distribution uniforme des contraintes normales et de cisaillement au travers de la section S de l'inclusion selon la surface potentielle de rupture A-A considérée normale à l'axe de l'inclusion.

L'état de contraintes dans l'inclusion correspondant aux efforts T_n et T_c au droit de la surface potentielle de rupture A-A est celui représenté par le cercle de Mohr de la Figure 328. Il considère que la contrainte τ'_A normale à la face perpendiculaire à la surface A-A est nulle.

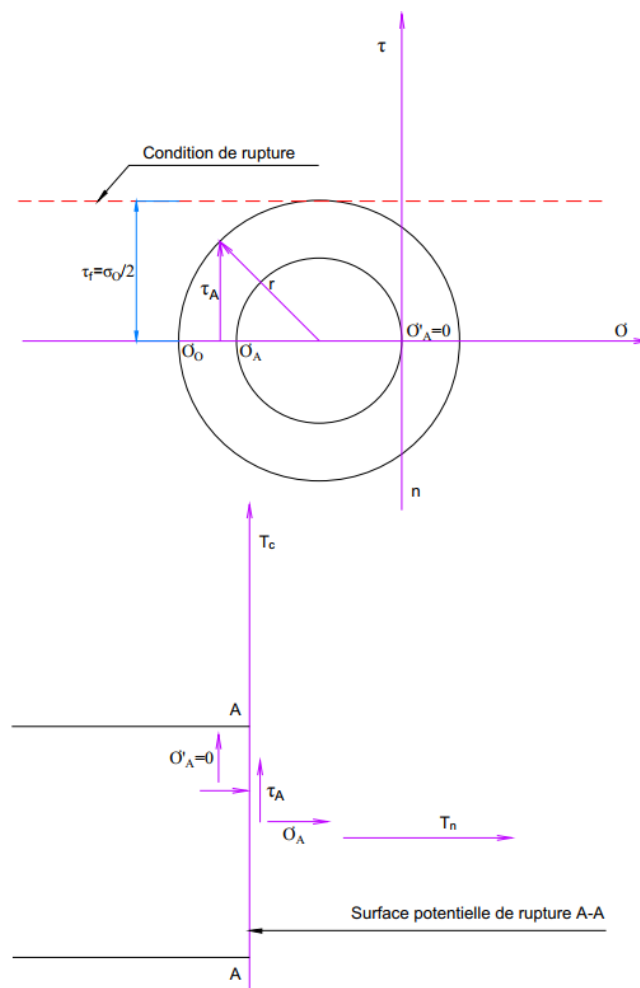


Figure 160 : résistance propre de l'inclusion

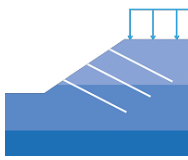
L'état de contrainte limite selon le critère de rupture de Tresca est :

$$r \leq \tau_f = \sigma_o/2$$

Avec :

σ_o , la contrainte de rupture à la traction pure

$$r^2 = \left(\frac{\sigma_A}{2}\right)^2 + \tau_A^2 \leq \frac{\sigma_o^2}{4}$$



Exprimé en termes d'efforts T_c et T_n :

$$\frac{T_n^2}{4} + T_c^2 \leq R_c^2 = \frac{R_n^2}{4}$$

Avec :

- R_c , la résistance en cisaillement de l'inclusion
- R_n , la résistance en traction de l'inclusion

$$\frac{T_n^2}{R_n^2} + \frac{T_c^2}{R_c^2} \leq 1$$

L'équation définit la condition de rupture de l'inclusion au point O, point de moment nul et d'effort de cisaillement maximum. Dans un repère (T_n, T_c) . Le domaine décrit par l'équation précédente est une ellipse de grand axe R_n et de petit axe R_c avec :

$$R_n = 2R_c$$

5.6.4.4. Interaction par frottement latéral

L'effort normal, T_n , dans l'inclusion, au droit de la surface potentielle de rupture A-A doit être inférieur au frottement sol-inclusion maximum qui peut être mobilisé sur la longueur d'ancrage, L_a , de l'inclusion.

$$T_n \leq T_{nl} = \pi \cdot B \cdot L_a \cdot \tau_{max} = f_1 \cdot L_a$$

Avec :

- T_n , effort normal dans l'inclusion
- T_{nl} , effort normal limite d'interaction par frottement latéral
- B , diamètre de l'inclusion
- L_a , longueur d'ancrage de l'inclusion depuis la surface potentielle de rupture considérée
- τ_{max} , contrainte de cisaillement limite entre sol et l'inclusion
- f_1 , effort d'arrachement limite pour un mètre de longueur d'inclusion, appelé aussi paramètre de frottement latéral.

τ_{max} , peut être déterminé par des essais d'arrachement, des corrélations avec p_i , la pression limite du sol ou à partir des caractéristiques géotechniques des sols et des conditions de mise en œuvre des inclusions.

Le critère d'interaction par frottement latéral est représenté sur la Figure 327 par une droite verticale d'abscisse T_{nl} .

5.6.4.5. Interaction par pression de contact inclusion-sol

La déformée de l'inclusion sollicitée par un déplacement relatif $2y_0$ entre les deux masses de sol situées de part et d'autre de la surface potentielle de rupture est représentée sur la Figure 329. Il est fait l'hypothèse que la pression est maximum au point O, point où le déplacement est maximum. Le problème est assimilable à celui de la sollicitation latérale d'un pieu dont la l'analyse a été décrite par Bourges et Franck (1979).

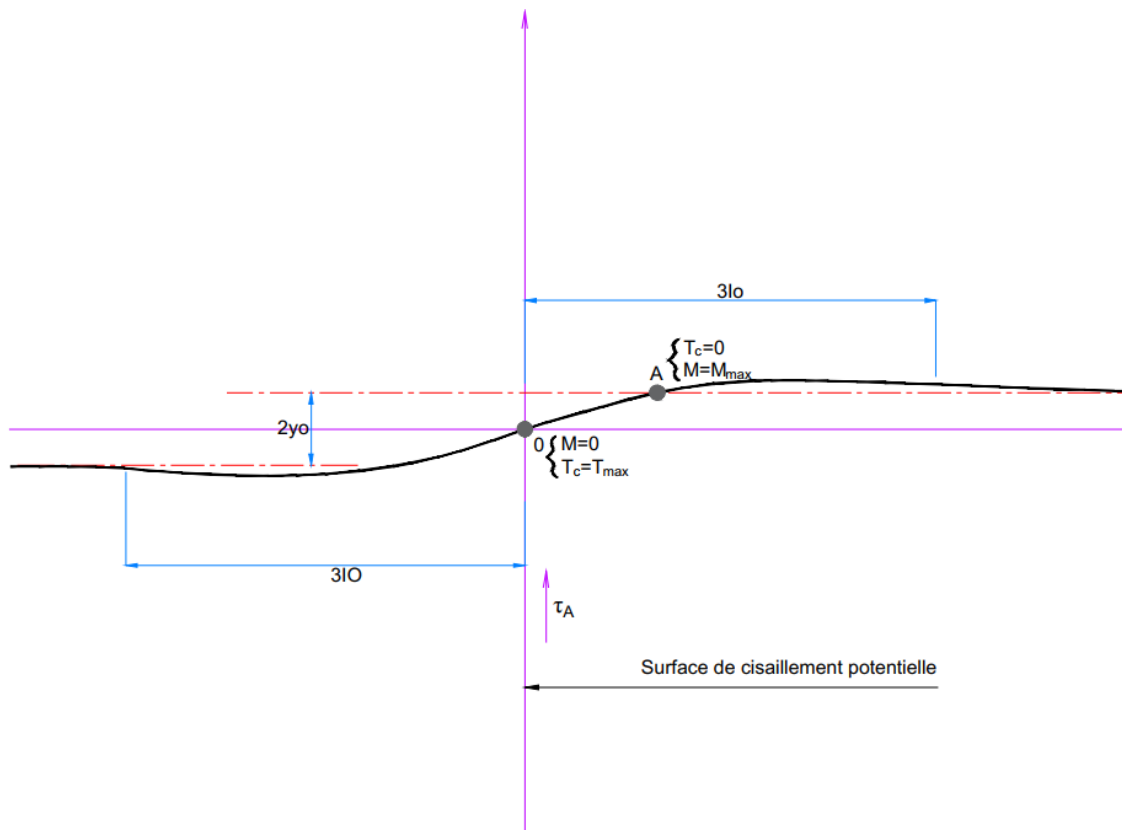
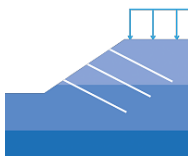


Figure 161 : déformée de l'inclusion, déplacement relatif $2 y_0$

La solution générale de l'équation différentielle qui exprime l'équilibre d'une poutre sur appuis élastiques fait intervenir la longueur de transfert, l_0 , qui caractérise la rigidité relative sol-inclusion :

$$l_0 = \sqrt[4]{\frac{4EI}{K_s \cdot B}}$$

Avec :

- EI : la rigidité à la flexion de l'inclusion
- K_s : le module de réaction du sol
- B : la largeur de l'inclusion

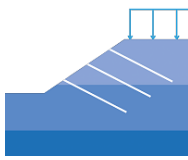
Pour les cas généralement rencontrés dans la pratique, la longueur l_0 est limitée à quelques dizaines de centimètres. Dans ce cas, le pieu est considéré comme infiniment long et par raison de symétrie, le moment est nul au point O, point d'interaction avec la surface potentielle de rupture. La solution analytique montre que :

- la pression de contact sol-inclusion, p , est maximale au point d'intersection O.
- le moment de flexion dans l'inclusion est maximal au point A situé à $\frac{\pi}{4} l_0$ du point d'intersection O.

Dans l'expression des conditions limites d'interaction par pression de contact inclusion-sol, on veut éviter les conditions de rupture aux points O et A par plastification du sol au point O et plastification de l'inclusion au point A.

Les deux cas suivants peuvent se présenter :

Cas 1: la pression limite du sol, p_l , est atteinte en O avant la plastification de la barre en A. On montre alors que l'effort tranchant limite T_{cl} , mobilisé en O vaut :



$$T_{cl1} = \frac{B \cdot l_0 \cdot p_l}{2}$$

Bien que l'effort tranchant continue d'augmenter avec la plastification progressive du sol le long de la barre, on limite l'effort tranchant à la valeur donnée précédemment pour rester dans un domaine de déformations admissibles. Sur le diagramme (T_n, T_c) de la Figure 327, cette condition limite correspond à une droite parallèle à l'axe T_n d'ordonnée

Cas 2 : La plastification de la barre en A est atteinte avant celle du sol en O. Il se crée une rotule plastique en A mais le sol reste à l'état élastique en O. Dans ce cas, la valeur de l'effort tranchant limite T_{cl2} est donnée par l'expression :

$$T_{cl2} = 0.239 \cdot B \cdot l_0 \cdot p_l + 1.62 \cdot \frac{M_{max}}{l_0}$$

Avec :

M_{max} , le moment de plastification de l'inclusion.

L'inclusion travaillant en flexion composée, M_{max} et T_n ne sont pas indépendants et la courbe limite de T_{cl2} se présente sous la forme d'une courbe d'allure parabolique centrée sur l'axe T_c et de concavité tournée vers le bas telle qu'indiquée sur la Figure 327.

5.6.4.6. Combinaison des différents critères

L'enveloppe inférieure des différents critères décrits précédemment définit le domaine dans lequel doit être contenu l'effort résultant dans les inclusions T (T_n, T_c). Ce domaine est indiqué sur la Figure 327.

Pour connaître les valeurs de T_n et T_c à introduire dans les équations d'équilibre, on applique le principe du travail maximal pour un déplacement du sol τ tangent à la surface de rupture. On a :

$$(\vec{T} - \vec{T}^*) \cdot \vec{\delta} \geq 0$$

Avec :

$\vec{T}^*$, l'effort mobilisé à la rupture dans l'inclusion

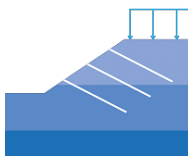
$\vec{T}$, tout effort licite, c'est-à-dire qui satisfait aux différents critères

5.6.5. Surfaces de rupture

5.6.5.1. Surfaces circulaires

Le programme dispose de deux méthodes pour la génération des surfaces circulaires et la recherche du cercle de facteur de sécurité minimum :

- La méthode de la boîte des centres
- La méthode des intervalles d'entrée et de sortie



La méthode de la boîte des centres est décrite sur la Figure 330. Dans cette méthode, une grille de centres de cercles de rupture est établie à partir de deux points de coordonnées (X_G, Y_G) et (X_D, Y_D) , du nombre d'intervalles m selon l'axe x et du nombre d'intervalles n selon l'axe y .

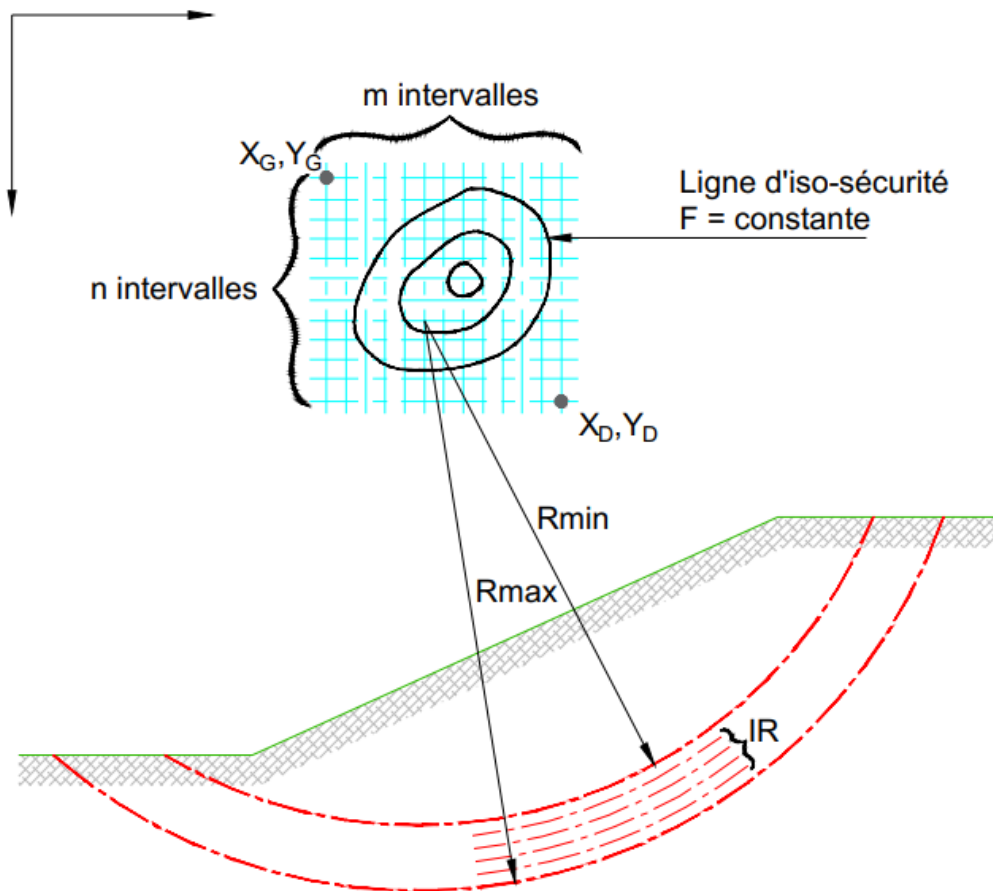


Figure 162 : méthode des boîtes de centre.

En chaque point de la grille, L cercles de rayon R compris entre R_{min} et R_{max} sont analysés, seul le cercle donnant le facteur de sécurité minimum étant retenu.

A la fin de l'analyse, des lignes d'iso-facteur de sécurité sont établies à partir du facteur de sécurité retenu en chaque point et le facteur de sécurité minimum est identifié.

La méthode des intervalles d'entrée et de sortie est décrite sur la Figure 24. Elle consiste à définir un intervalle d'entrée en pied de talus et un intervalle de sortie en sommet de talus. L'intervalle d'entrée peut être délimité soit par les abscisses (X_G, X_D) soit par les ordonnées (Y_G, Y_D) .

Sur l'intervalle d'entrée, $n-1$ points équidistants sont définis ; à partir de chacun de ces points ainsi que des limites X_G et X_D ou Y_G et Y_D , m cercles sont générés à l'intérieur du fuseau des cercles géométriquement possibles, ces cercles ayant une densité de probabilité uniforme sur l'intervalle de sortie.

Sur l'ensemble des cercles analysés, les dix cercles donnant le facteur de sécurité le plus faible sont retenus; les coordonnées des centres et les rayons sont imprimés et les cercles sont dessinés, le cercle le plus critique étant identifié.

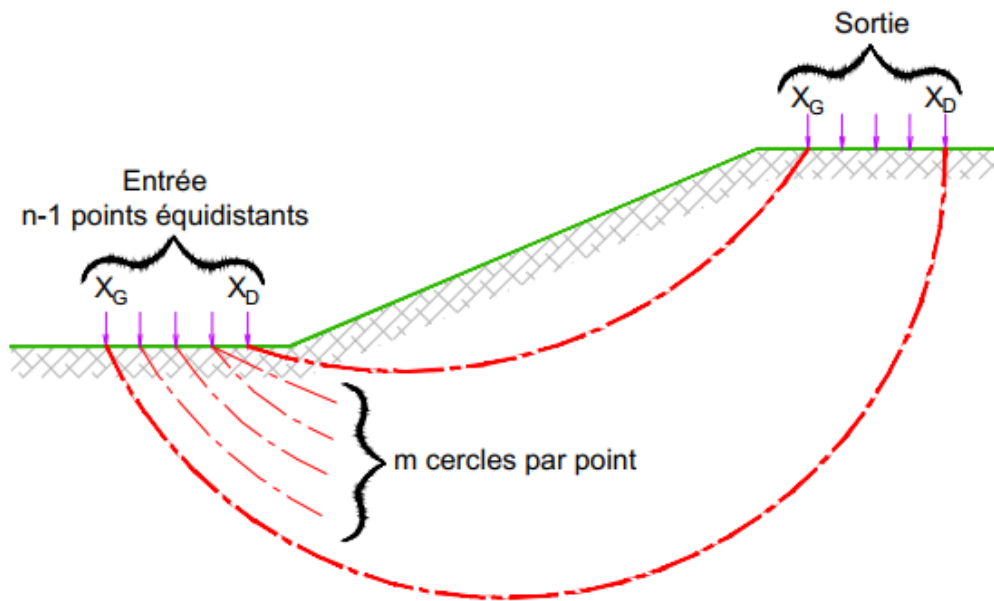
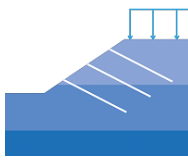


Figure 163: méthodes des intervalles d'entrée et de sortie

5.6.5.2. Surfaces non circulaires

Dans l'analyse des surfaces non circulaires, on différencie la détermination du facteur de sécurité d'une surface dont la géométrie est fixée, du processus de recherche de la surface ayant un facteur de sécurité minimum.

5.6.5.3. Surfaces quelconque fixée

Dans le cas d'une surface unique (option « vérification d'une surface » du programme), la géométrie est entièrement fixée par les coordonnées des points d'extrémité à la surface et des segments de droite définis par une série de points de coordonnées (X, Y).

Une surface introduite de cette manière est analysée selon la méthode de Carter, même si elle est circulaire et le facteur de sécurité obtenu peut être légèrement différent de celui calculé par la méthode de Bishop simplifiée pour la même surface circulaire.

5.6.5.4. Spirale logarithmique

Dans cette méthode, une surface ayant une forme de spirale logarithmique est recherchée.

Le principe de la méthode est le même que celui de la méthode des intervalles pour les surfaces circulaires définie sur la Figure 331, seulement les surfaces étudiées ont la forme d'une spirale logarithmique.

5.6.5.5. Méthode des boîtes

La méthode des boîtes est décrite sur la Figure 332. Elle consiste à définir un certain nombre de boîtes par lesquelles les surfaces de rupture passent forcément. Entre deux boîtes adjacentes, la surface de rupture est rectiligne, les points à l'intérieur de chaque boîte étant générés de façon aléatoire.

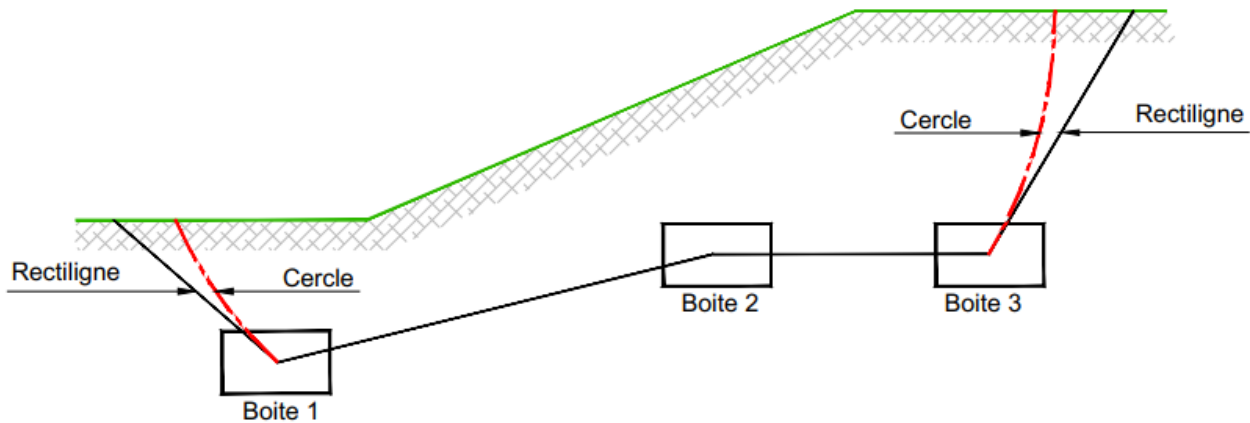
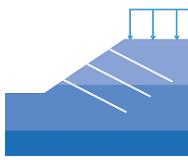


Figure 164 : surfaces non-circulaires, méthode des boîtes.

De part et d'autre des boîtes d'extrémité, les surfaces de rupture sont prolongées par des coins de poussée et de butée ou des cercles.

A la fin du processus d'analyse, les dix surfaces les plus critiques sont retenues avec leur facteur de sécurité. Elles sont représentées graphiquement et la surface critique est identifiée.

5.6.6. Prise en compte des sollicitations sismiques

Dans la prise en compte des séismes, il faut différencier les cas de surfaces circulaires analysées par la méthode de Bishop modifiée de ceux des surfaces quelconques analysées par la méthode de Carter.

5.6.6.1. Méthode de Bishop modifiée

Dans le cas d'analyses de surfaces circulaires par la méthode de Bishop modifiée, les recommandations de l'AFPS sont appliquées :

Le problème est ramené au cas habituel de forces dans un champ gravitaire vertical en faisant, tel qu'indiqué sur la Figure 333, subir à l'ensemble du profil, ouvrage et charges comprises, une rotation égale à θ_a dans le cas où les coefficients sismiques σ_H et $+\sigma_V$ sont appliqués et θ_b dans le cas où σ_H et $-\sigma_V$ sont appliqués, avec :

$$\theta a = \arctg \frac{\sigma H}{1 + \sigma v}$$

$$\theta b = \arctg \frac{\sigma H}{1 - \sigma v}$$

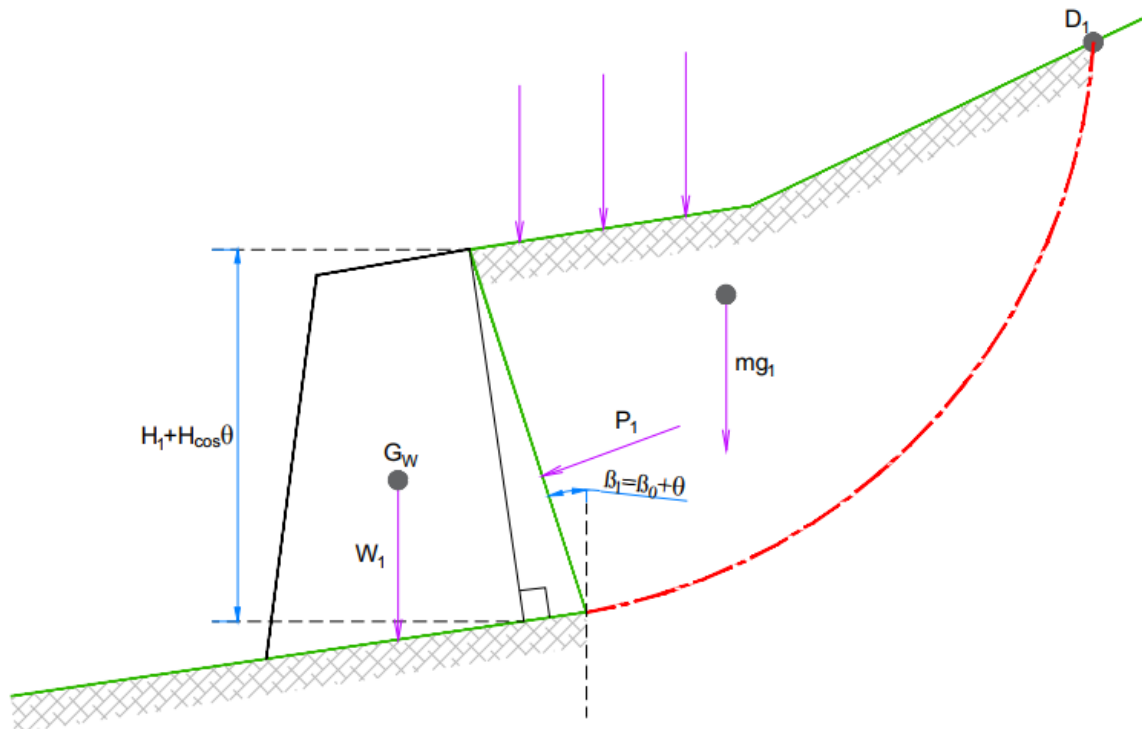
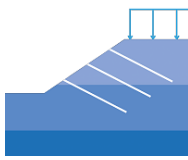


Figure 165 : Bishop simplifiée -prise en compte de l'effet des séismes par rotation de l'ensemble (selon recommandation AFPS).

L'intensité du champ de pesanteur étant remplacée par l'intensité fictive

$$ga = \frac{1 + \sigma v}{\cos \theta a} g$$

$$gb = \frac{1 - \sigma v}{\cos \theta b} g$$

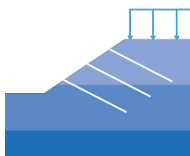
Avec :

- σ_H , coefficient sismique horizontal
- σ_v , coefficient sismique vertical
- g , accélération de la pesanteur

Dans le cas où la rotation du système entraîne un surplomb du talus (cas des parois clouées avec un parement raide), cette approche n'est pas applicable. Il n'est pas appliqué de rotations et les efforts sismiques sont alors introduits comme des forces verticales et horizontales appliquées au centre de gravité. Ces forces sont prises en compte dans l'équation d'équilibre global des moments et elles sont ajoutées dans l'équation du facteur de sécurité de la méthode de Bishop modifiée.

5.6.6.2. Méthode de Carter

Dans le cas des surfaces de rupture de forme quelconque analysées par la méthode de Carter, il n'est pas procédé à une rotation du profil. Les équations d'équilibre sont modifiées pour inclure les forces massiques verticales et horizontales dues aux séismes.



5.7. Calculs sur les clous

5.7.1. Efforts au parement

Le logiciel GeoStab permet désormais de récupérer les efforts nécessaires au dimensionnement du parement d'une paroi clouée.

Les recommandations CLOUTERRE 1991 préconisent, pour le dimensionnement du parement :

« Par souci de simplification, on admet généralement que le torseur des efforts à la liaison clou-parement se réduit à un effort axial de traction T_0 et que la pression des terres p est uniforme.

Deux approches sont possibles : soit calculer les tractions T_0 à partir des efforts maximaux mobilisables dans les clous pour en déduire p , soit calculer p comme une poussée locale des terres dans un mécanisme de rupture approprié pour en déduire T_0 . En l'absence actuelle de données fiables sur les répartitions de la pression des terres sur le parement, il est recommandé d'utiliser la première approche, décrite ci-après. La valeur de T_0 se déduit de celle de l'effort maximum de traction T_{max} , mobilisable sur la surface de rupture potentielle la plus critique en considérant une valeur unique pour le rapport T_0/T_{max} , dans le mur. »

Préalablement, le logiciel calcule les efforts dans les clous pour toutes les surfaces de rupture.

$$F_{clou} = \text{Max}(L_u \cdot \frac{q_s}{\Gamma_{qs}} \cdot \pi \cdot \phi; \frac{F_{arm}}{\Gamma_{acier}})$$

Avec :

- L_u : longueur utile du clou, celle-ci correspond à la distance entre l'intersection clou / surface de rupture et l'extrémité du clou,
- q_s : valeur du frottement latéral entre le sol et le clou : si plusieurs sols sont traversés par le clou, l'effort sera calculé pour chaque section,
- Γ_{qs} : facteur de sécurité pris pour le frottement latéral du sol,
- ϕ : diamètre de forage du clou,
- F_{arm} : résistance structurale du clou,
- Γ_{acier} : facteur de sécurité sur la résistance structurale des clous.

Pour les efforts au parement, le programme calcule 4 types d'efforts :

- T_{max} : effort maximal strictement nécessaire à l'intersection clou / surface de rupture sur l'ensemble des surfaces calculées pour obtenir le facteur de sécurité visé (stabilité du site).
 - Pour la $i^{\text{ème}}$ surface, l'effort T_{0i} dans le clou fait varier le facteur de sécurité de Fs_{0i} (sans inclusions) à Fs_{ri} (avec inclusions),
 - Recherche par itérations de T_i strictement nécessaire pour que le facteur de sécurité passe de Fs_{0i} à $Fs_{visé}$,
Itération de ce processus sur l'ensemble des surfaces de rupture,
 - $T_{max} = \max(T_i)$.
- L'effort T_0 , correspondant à l'effort au parement issu du calcul de stabilité du site. Il correspond à l'effort T_{max} minoré par la déduction des forces de frottement latéral entre le parement et la surface de rupture calculée.

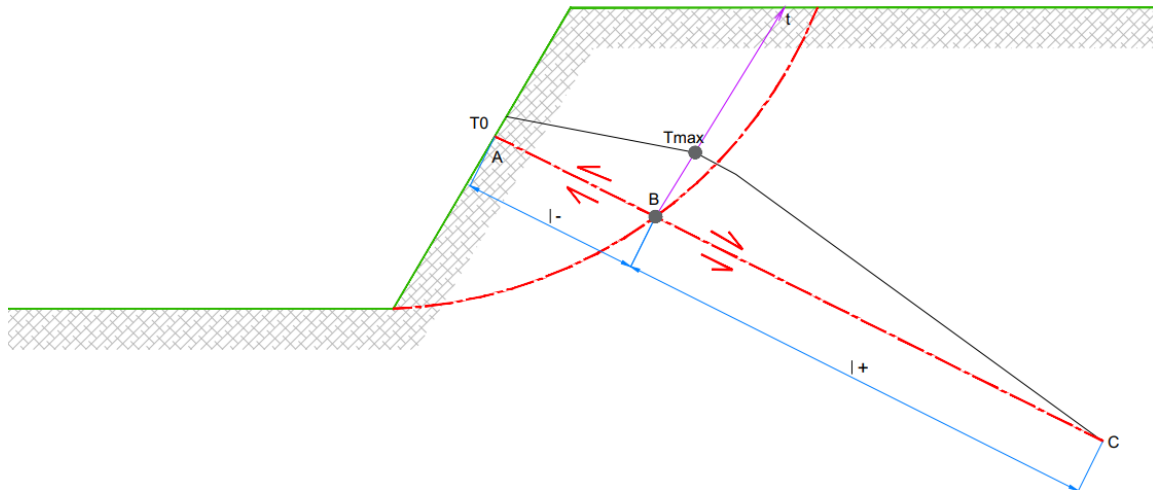
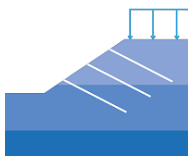


Figure 166 : effort T0

- L'effort T_1 , strictement nécessaire dans l'axe du clou pour que le poids du parement soit repris par frottement sur le sol (condition de non-glissement du parement)

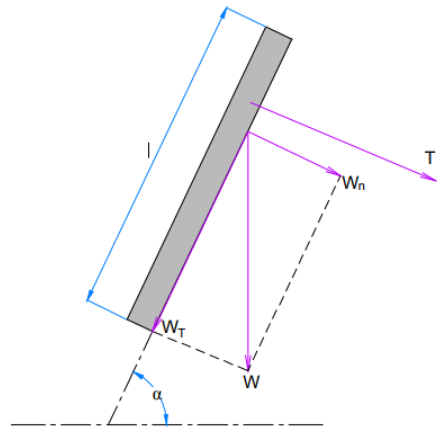


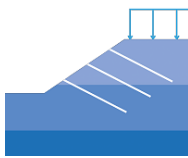
Figure 167 : effort T1

- L'effort T_2 , strictement nécessaire pour que le parement puisse reprendre les efforts de poussée. Ainsi, GeoStab calcule l'effort de poussée par la méthode de CULMANN, comme le fait GEOMUR, le majeure pour tenir compte d'un état intermédiaire entre la poussée active et celle au repos, puis il en déduit le diagramme de contraintes à l'arrière de la paroi. Afin de tenir compte de la présence des clous, il est possible de redéfinir ce diagramme selon une forme à définir dans le logiciel (rectangulaire, triangulaire ou trapézoïdale), comme cela est fait pour les tranchées blindées (cf. Philipponnat fig. 9.37).
 - La poussée exercée sur l'écran s'écrit :

$$T_2 = P_A \left[\frac{K_0}{K_A} + \frac{\delta}{\delta_A} \left(1 - \frac{K_0}{K_A} \right) \right]$$

- Avec δ le déplacement relatif mesuré lors de la réalisation de parois clouées et δ_A le déplacement relatif de l'écran nécessaire pour atteindre l'état actif.
- D'après les Recommandations CLOUTERRE 1991 (Tableau 13.3.1.1) et l'Annexe C3 de la norme NF 1997-1-EC7 (Tableau C1) : $\delta/\delta_A = 0,4$. Ainsi :

$$T_2 = 1,3 P_A$$



- En l'absence de tout déconfinement, la poussée exercée sur l'écran serait celle au repos et dans ce cas le rapport K_0/K_a est compris entre 1,4 et 1,6 (pour des valeurs courantes de ϕ (25° à 40°)). Soit en moyenne :

$$T_2 = P_A \cdot \left(\frac{K_0}{K_a} \right) = 1,5 \cdot P_A$$

- Si le déconfinement est tel que l'état actif peut être atteint, alors la poussée exercée sur l'écran serait :
 $T_2 = P_A$
- La poussée sur l'écran est donc comprise entre 1 et 1,5 P_A . Il est proposé de retenir $T_2 = 1,3 P_A$. Cependant, si toute déformation était bloquée, alors la valeur proposée $T_2 = 1,3 P_A$ sous-estime la poussée appliquée sur le parement et la valeur à retenir pour T_2 est $T_2 = 1,5 P_A$.

L'effort maximum parmi T_0 , T_1 et T_2 est l'effort ponctuel en tête à retenir pour le calcul ultérieur du parement de la paroi.

5.7.2. Calcul des longueurs optimisées de clous

Le programme permet le calcul de la longueur strictement nécessaire pour obtenir le facteur de sécurité visé, et ce, en accord avec les règles pratiques du terrain : un clou ne peut pas avoir une longueur supérieure à celui posé à la passe précédente. Celle-ci est calculée par calculs itératifs pour chaque lit de clous.

Les longueurs de clous envisageables par profondeur sont calculées. La longueur minimum pour assurer la stabilité avec le facteur de sécurité visé est retenue et le calcul est poursuivi à la profondeur suivante avec notamment la contrainte de calcul suivante ;

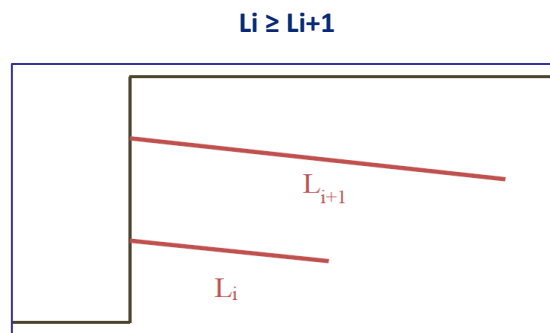


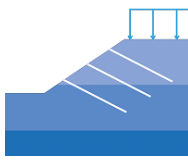
Figure 168 : optimisation de la longueur des clous

5.8. Vérification de Kranz

5.8.1. Généralités

La méthode de Kranz est une méthode de vérification de la stabilité du massif d'ancrage d'un écran de soutènement, elle permet de vérifier que la réaction d'ancrage s'exerce suffisamment loin pour ne pas prendre appui sur l'écran. Les ancrages sont alors pris en compte suivant la position de leurs points d'ancrage effectif par rapport aux limites du bloc étudié.

Cette méthode est désormais présentée dans l'annexe nationale NF P 94-282 (Annexe G) à l'EUROCODE 7 comme la procédure normalisée.



5.8.2. Mécanismes de rupture

Un écran de soutènement retenu par des ancrages peut être affecté par différents mécanismes de rupture (figure 9) qui peuvent être :

- un glissement généralisé, notamment dans le cas de sols de caractéristiques médiocres,
- une rupture du scellement, si la traction transmise au sol est supérieure à sa résistance. Le massif se renverse mais la courbe de rupture ne peut pas se former, c'est le tirant qui "lâche",
- un renversement du massif, lorsque l'effort de traction du tirant déstabilise le massif. La rupture se produit suivant une ligne de rupture bc en arc de cercle et selon les prismes de poussée en arrière de l'ancrage et de butée en avant de l'écran.

La méthode de Kranz est une des méthodes de vérification de la stabilité au renversement du massif des terres.

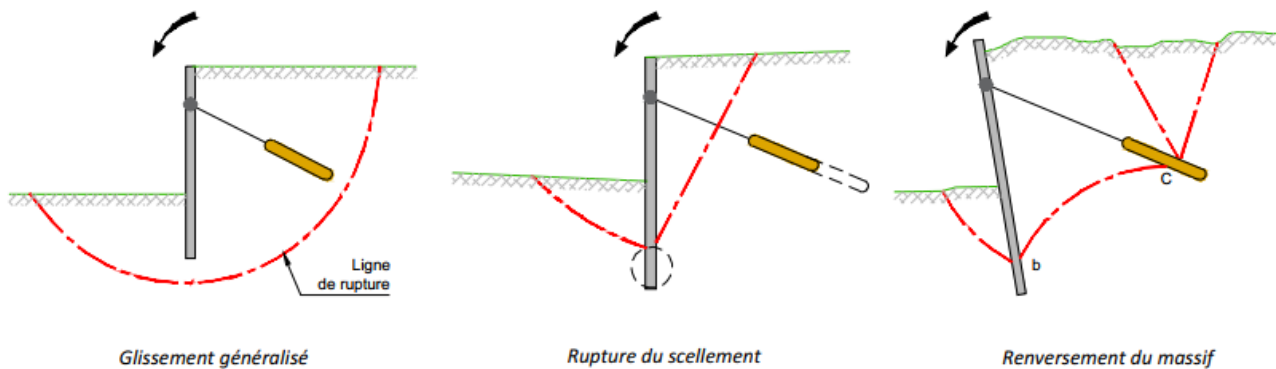


Figure 169 : mode de rupture

5.8.3. Définition du facteur de sécurité de Kranz

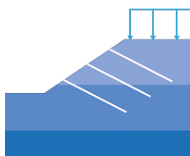
La vérification de la stabilité par la méthode de Kranz s'effectue à l'état limite ultime, c'est-à-dire, à la rupture. Elle s'écrit :

$$R' \geq F_s . R$$

Avec :

- R : réaction appliquée par l'ancrage
- F_s : coefficient global de sécurité (fixé au minimum à 1.5 par les recommandations Tirants d'Ancrages 95 et à 1 en utilisant l'approche 2 de l'Eurocode 7)
- R' : effort maximal compatible avec la sécurité du massif

A la différence des méthodes de Bishop ou Fellenius où le facteur de sécurité représente le rapport de la résistance du sol sur la résistance mobilisée, Kranz définit son facteur de sécurité sur des actions. C'est le rapport de la force d'ancrage maximum R' qui provoque l'instabilité sur la force d'ancrage réellement appliquée.



5.8.4. Equations de base

5.8.4.1. Géométrie

Le massif de sol *MCEF* est délimité comme l'indique la figure suivante :

- à l'avant par un plan MF tangent au soutènement passant par un point M situé au-dessus du point B d'effort tranchant nul ;
- à l'arrière par un plan vertical EC dit plan d'ancrage fictif passant par le point C, point d'ancrage fictif (ici le centre de la partie scellée) ;
- en bas, par la ligne de glissement BC.

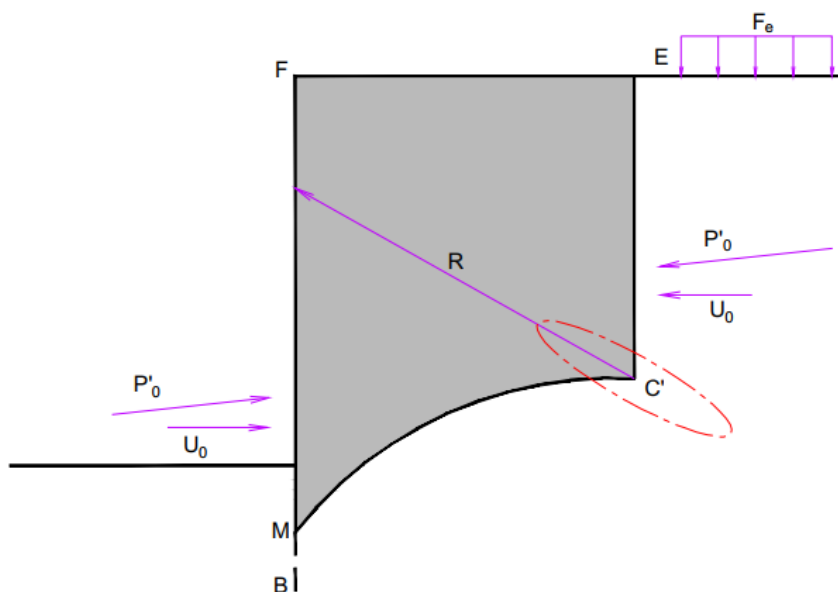


Figure 170 : équilibre du massif

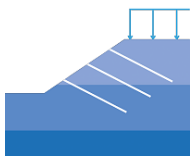
Le point C est le point d'application de la force d'ancrage. Il est appelé "point d'ancrage fictif". Il correspond généralement au centre de la partie scellée mais peut être situé à une distance de l'extrémité égale à l'espacement entre deux tirants successifs de la même nappe.

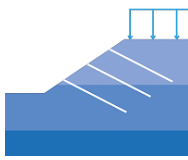
La surface de glissement la plus défavorable entre le point C et un point M quelconque du segment FB peut être déterminée par des segments de droite ou des successions d'arcs de spirale logarithmique.

Les coefficients partiels appliqués à l'Eurocode 7 (Approche 2) pour la méthode de Kranz sont donnés en annexe C.

Selon l'annexe G de la norme NF P 94-282, l'effort maximal compatible avec la sécurité du massif est minimum lorsque la surface de rupture est constituée d'arcs de spirale logarithmique non de segments de droite. La thèse de F. Masroui a montré que la ligne de rupture de la méthode de Kranz est plus proche d'une ligne droite que d'une spirale logarithmique, les moyens informatiques actuels permettant de traiter rapidement un grand nombre de surfaces de type spirales logarithmiques.

Pour établir cette surface critique, une méthode de calcul à la rupture est retenue, avec des arcs de spirales logarithmiques à concavité dirigée vers le haut. Selon cette méthode, l'effort maximal compatible avec la sécurité du massif est obtenu en considérant les forces conduisant à la rupture du bloc.





5.8.4.2. Forces en présence

L'ensemble des efforts en présence est présenté sur la figure suivante :

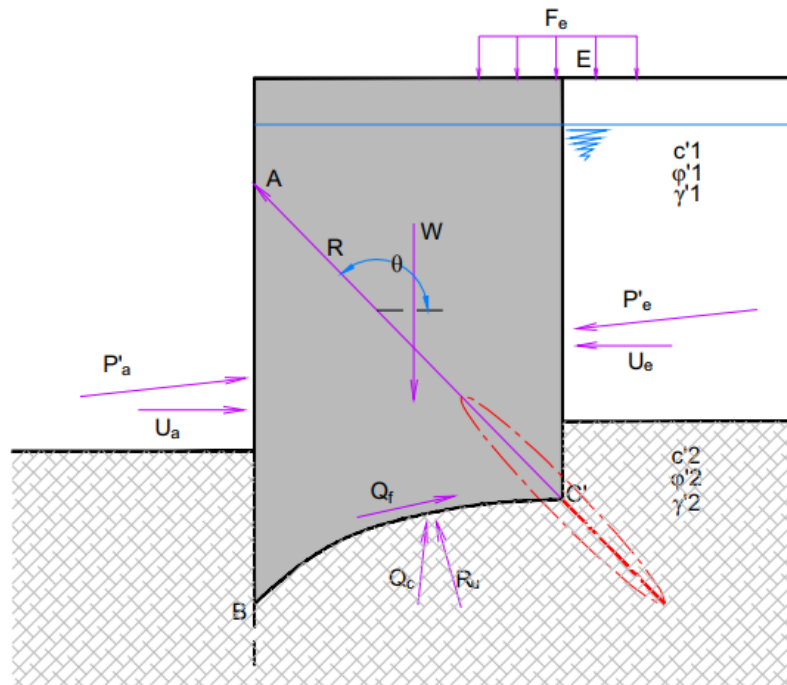


Figure 171 : efforts sur le massif

Avec :

- W : poids du massif ;
- P'_e : réaction de l'écran, égale et opposée à la poussée des sols et des surcharges sur l'écran ;
- P'_a : poussée, surcharge comprise, sur le plan d'ancrage fictif EC ;
- R : réaction d'ancrage ;
- F_e : forces extérieures ;
- Q_c : réaction de cohésion du terrain sous-jacent sur la surface de rupture BC ;
- Q_f : réaction de frottement du terrain sous-jacent ;
- U_a : résultante des pressions d'eau ;
- U_e : force opposée à la résultante des pressions d'eau ;
- R_u : résultante des pressions d'eau sur la surface de rupture.

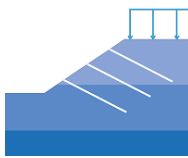
Remarques :

Selon la norme NF P 94-282, la butée qui s'applique sur le segment BF n'est pas prise en compte.

Dans le cas hydrostatique, l'équilibre peut être étudié en ne considérant que le poids volumique total pour les parties hors nappe et le poids volumique déjaugé pour les parties sous nappe, en ignorant les forces dues à l'eau U_a , U_e et R_u .

5.8.4.3. Ecran avec plusieurs lits d'ancrage

Dans le cas d'un écran avec plusieurs lits de tirants d'ancrage, l'équilibre d'un bloc de chaque lit d'ancrages est à étudier en tenant compte :



- des forces d'ancrages appliquées à l'intérieur du bloc considéré,
- des forces d'ancrages extérieures au bloc qui exercent une influence sur les contraintes appliquées au bloc (la force d'ancrage P_e diffusée dans le prisme de poussée du sol sur la figure suivante).

Les autres forces d'ancrages, et notamment les efforts tels que présentés sur la figure ci-dessous n'ont pas lieu d'être prises en compte.

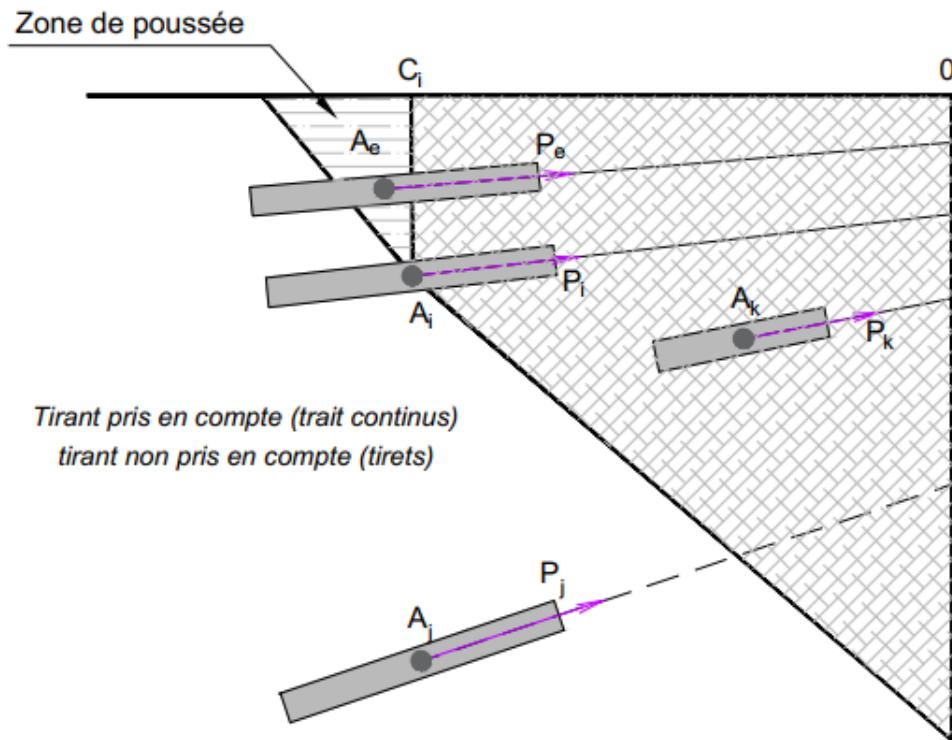
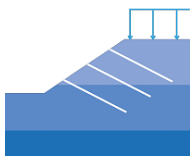
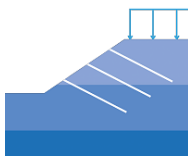


Figure 172 : lits d'ancrages multiples



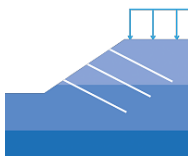
Bibliographies

- AFNOR NF EN 1997-1 et NF EN 1997-1/NA « Eurocode 7 – Calcul géotechnique – Partie 1 : Règles générales », 2005 et son annexe nationale.
- AFNOR NF P 94-270 Ouvrages de soutènement - Remblais renforcés et massifs en sol cloué, 2009.
- AFNOR NF P 94-282 Ouvrages de soutènement – Ecrans, Réf. NF P94-282, Mars 2009.
- AFPS "Recommandations AFPS 90 pour la rédaction de règles relatives aux ouvrages et installations à réaliser dans les régions sujettes aux séismes", Tome 1 et 2.
- Bishop A.W. (1955). "The use of the Slip Circle in the Stability Analysis of Slopes", Geotechnique, Vol. 5, No. 1, March, pp. 7-17.
- Bishop A.W. and Morgenstern N. (1960). "Stability Coefficients for Earth Slopes" Geotechnique, Vol. 10, No.4, Dec., pp. 129-150.
- Blondeau F., Christiansen M., Guilloux A., Schlosser F., "Talren Méthode de calcul des ouvrages en terre renforcée", Compte rendu du colloque international sur le renforcement en place des sols, Paris 9-11 octobre 1984.
- Bridle R.J., "Soil nailing- Analysis and design", Ground Engineering, sept. 1989.
- Bridle R.J., "Soil nailing- Discussion", Ground Engineering, July-August 1990.
- Carter, R. K. (1971). "Computer Oriented Slope Stability Analysis by Method of Slices", MSCE Thesis. Purdue University, West Lafayette, Indiana.
- Cartier G., "La stabilisation des pentes instables par clouage", Bulletin du LCPC n° 141, jan-fév. 1986.
- Comité Français de la Mécanique des Sols et des Travaux de Fondations, Recommandations Tirants d’Ancrage 95, Edition Eyrolles, 1995.
- Comité Français de Mécanique des Sols, "Recommandations concernant la conception, le calcul, l’exécution et le contrôle des tirants d’ouvrage.", Eyrolles 1995.
- Delmas P. et al., "Le dimensionnement des ouvrages renforcés par géotextile: programme CARTAGE", Bulletin du LCPC n°142, mars-avril 1986.
- Delmas P. et al., "Une nouvelle méthode de dimensionnement du clouage des pentes : programme PROSPER", Bulletin du LCPC n° 141, jan-fév. 1986
- EPFL (1996) "Etude du comportement d’une paroi expérimentale renforcée par clouage- Analyse du comportement mécanique de l’ouvrage. Comparaison des programmes de calcul". Rapport RX47, Institut des sols, roches et fondations, Laboratoire de Mécanique des Roches.
- FAURE R.M., Analyse des contraintes dans un talus par la méthode des perturbations, Revue Française de Géotechnique n°33, pp49-59, 1985.
- FAURE R.M., HORNYCH P., Journées françaises de géotechnique - Stabilité d'un bloc dans un massif surconsolidé, Décembre 1988.
- Faure R.M., Mouroux P., Rajot J.P., "Prise en compte des actions sismiques dans un programme de



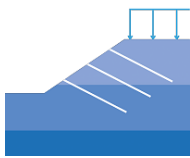
stabilité des pentes", Premier colloque National de génie parasismique, St Rémy les Chevreuse, 29-31 janvier 1986.

- FAVRE M., VERMOOTE E., FUENTES D. : « Réflexions et propositions pour le calcul optimisé des parois clouées » Conférence internationale sur les risques de glissement de terrain, accepté pour publication à l'ICLR 2013, 14-16 mars 2013, Tunisie.
- FELLENIUS W., Erdstatische Berechnungen mit Reibung und Kohäsion (Adhäsion) und unter Annahme kreiszylindrischer Gleitflächen, Ernst & Sohn, Berlin, 1927.
- Fellenius, W. (1927). Erdstatische Berichnungen mit Reibung und Kohäsion, " Wilhelm Ernst and Sohn KG, Berlin.
- FILLIAT G., La pratique des sols et des fondations, Edition du Moniteur, 1392 pages, 1981.
- Gigan J.P., Delmas P., " Mobilisation des efforts dans les ouvrages cloués : Etudes comparative de différentes méthodes de calcul", Bulletin du LCPC n°147, jan-fév 1987.
- Gillon A., "Calculs de stabilité de pentes- Dimensionnements de tunnels", Mémoire de fin d'études, IST Pierre et Marie Curie, 1997.
- Gudehus G. "Clouage des sols : règles de dimensionnement et leur vérification expérimentale", Revue française de Géotechnique n°19.
- Jewell R.A., Pedley M.J., "Soil nailing design : The role of bending stiffness", Ground Engineering, March 1990.
- Kovarik J.B. (1990), "Stabilité et dimensionnement STARS à la rupture des ouvrages de soutènement en sol renforcé. Comparaison des logiciels et TALREN". Projet en fin d'études, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées.
- Marche R., Favre M. (1999), "Dimensionnement et fluage à moyen terme d'un mur cloué de grande hauteur", Publication 138, Frühjahrstagung, 23 April 1999, Bern.
- MASROURI F. & KASTNER R., Essais sur modèle de rideaux de soutènement ; confrontation à diverses méthodes de calcul, Revue française de géotechnique n°55 pp17-33, 1990.
- MASROURI F., Comportement des rideaux de soutènement semi-flexibles – Etude théorique et expérimentale, INSA Lyon, 1986.
- Nonveiller, E. (1965). "The Stability Analysis of Slopes with a Slip Surface of General Shape," Proceedings, of the Sixth International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Montreal, Vol. 2, pp. 522-525.
- PETAL-LCPC, Programme d'études de la stabilité des talus en rupture circulaire et non-circulaire, Laboratoire des Ponts et Chaussées, France, 1984.
- PHILIPPONNAT G., HUBERT B., « Fondations et Ouvrages en terre », 1997 – 4^{ème} édition – Editions Eyrolles.
- Projet National CLOUTERRE II – Opération de génie civil et urbain, Additif 2002 aux recommandations CLOUTERRE 1991, pour la conception, le calcul, l'exécution et le contrôle des soutènements réalisés par clouage des sols, Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 2002.
- Projet National CLOUTERRE, Recommandations CLOUTERRE 1991 pour la conception, le calcul,



l'exécution et le contrôle des soutènements réalisés par clouage des sols, Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 1991.

- Raulin P., Rougues G., Toubol A., "Calcul de la stabilité des pentes en rupture non circulaire", Rapport de recherche des LPC N° 36-1974.
- Seed, H..B. and Sultan, H.A. (1967). "Stability Analysis for a Sloping Core Embankment", Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol. 93, No. SM4, July, pp. 69-83.
- SETRA (1998). "Les ouvrages de soutènement – Guide de conception générale", Décembre 1998.
- Sève G., "Stabilité des ouvrages géotechniques : données expérimentales et méthodes d'analyse", Thèse ENPC, 16 septembre 1998.
- Sève G., Pouget P. "Guide Technique : stabilisation des glissements de terrain", LCPC 1998.
- SMOLTCZYK U., Geotechnical Engineering Handbook 2: Procedures, Ernst & Sohn, Berlin, p 213.
- TEDENAT P., Leçons élémentaires de mathématiques - Deuxième partie, Duperat, pp64-76, 1801.
- Whitman, R. V. and Baily, W. A. (1967). "Use of Computers for Slope Stability Analysis, " Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol. 93, No. SM4, July, 475-498.
- Wright S.G., Kulhawy F.H. and Duncan J.M., (1973), "Accuracy of Equilibrium Slope Stability Analysis", Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol. 99, No. SM10, Oct., pp. 783-791.



Annexe A – Caractéristiques de clous et épingles couramment utilisés

1. Armatures Haute Adhérence

Il s'agit de barres à haute adhérence en acier dont la limite élastique est de 500 MPa.

Φ (mm)	Epaisseur sacrifiée à la corrosion			
	0 mm	2 mm	4 mm	8 mm
16	100.5	56.5	25.1	-
20	157.1	100.5	56.5	6.3
25	245.4	173.2	113.5	31.8
28	307.9	226.2	157.1	56.5
32	402.1	307.9	226.2	100.5
40	628.3	508.9	402.1	226.2
50	981.7	831.0	692.7	454.0

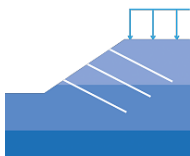
Tableau de Traction Elastique (kN)

Φ (mm)	Epaisseur sacrifiée à la corrosion			
	0 mm	2 mm	4 mm	8 mm
16	0,676	0,214	0,042	-
20	1,649	0,676	0,214	0,003
25	4,027	2,005	0,861	0,068
28	6,336	3,420	1,649	0,214
32	10,809	6,336	3,420	0,676
40	26,389	17,314	10,809	3,420
50	64,427	46,155	32,076	13,775

Tableau de EI (kN.m²)

Φ (mm)	Epaisseur sacrifiée à la corrosion			
	0 mm	2 mm	4 mm	8 mm
16	0,201	0,085	0,025	-
20	0,393	0,201	0,085	0,003
25	0,767	0,455	0,241	0,036
28	1,078	0,679	0,393	0,085
32	1,608	1,078	0,679	0,201
40	3,142	2,290	1,608	0,679
50	6,136	4,778	3,637	1,929

Tableau des Moments Elastiques (kN.m)



2. Clous auto-foreur

Φ (mm)	Φ (mm)	Epaisseur sacrifiée à la corrosion			
Externe	Interne	0 mm	2 mm	4 mm	8 mm
30	16	180,0	105,0	41,9	-
30	11	260,0	171,0	96,7	-
40	16	525,0	393,4	276,8	88,7
73	53	970,0	716,3	477,6	44,9
103	78	1570,0	1260,7	964,0	408,3

Tableau de Traction Elastique (kN)

Φ (mm)	Φ (mm)	Epaisseur sacrifiée à la corrosion			
Externe	Interne	0 mm	2 mm	4 mm	8 mm
30	16	4,967	2,311	0,725	-0,513
30	11	4,706	2,353	0,980	-0,039
40	16	18,854	11,698	6,716	1,368
73	53	164,754	113,078	70,001	5,667
103	78	665,863	508,656	369,846	141,505

Tableau de EI (kNm²)

Φ (mm)	Φ (mm)	Epaisseur sacrifiée à la corrosion			
Externe	Interne	0 mm	2 mm	4 mm	8 mm
30	16	0,745	0,390	0,139	-
30	11	0,957	0,552	0,270	-
40	16	2,751	1,884	1,203	0,310
73	53	11,247	8,016	5,155	0,450
103	78	26,396	20,690	15,437	6,220

Tableau des Moments Elastiques (kN.m)

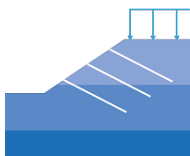
3. Corrosion

- Selon CLOUTERRE

L'épaisseur sacrifiée à la corrosion à l'extérieur des armatures est déterminée par le tableau suivant, tiré de CLOUTERRE 91.

Sol	Ouvrage provisoire ≤ 18 mois	Ouvrage temporaire 1,5 à 30 ans	Ouvrage permanent 30 à 100 ans
Peu corrosif	0 mm	2 mm	4 mm
Moyennement corrosif	0 mm	4 mm	8 mm
Corrosif	2 mm	8 mm	gaine plastique
Fortement corrosif	gaine plastique	gaine plastique	gaine plastique

Pour connaître de degré de corrosion du sol, il est recommandé de se reporter aux recommandations CLOUTERRE - Chapitre 6 - § 3.3.



- Selon la NF P 94-270

La valeur de calcul de la traction élastique $R_{t;d}$ à rentrer dans GeoStab est donnée pour les clous par la relation :

$$R_{t;d} = \min (R_{t;dy} ; R_{t;dr}) \quad (\text{NF P 94-270 §F.2.1.1(8)})$$

Avec :

- $R_{t;dy} = (1-\gamma_y \cdot \Delta S / S_0) \cdot (S_0 \cdot f_y / \gamma_{M0})$ (NF P 94-270 §F.2.1.1(5))
- $R_{t;dr} = (1-\gamma_r \cdot K\Delta S / S_0) \cdot (S_0 \cdot f_r / \gamma_{M2})$ (NF P 94-270 §F.2.1.1(6))
-
- $\gamma_{M0} = 1.0$ et $\gamma_{M2} = 1.25$ (NF P 94-270 §F.2.1.2)

Le calcul de $R_{t;dy}$ et $R_{t;dr}$ se fait différemment selon que l'on considère que les clous sont à l'abri ou non d'une protection contre la corrosion.

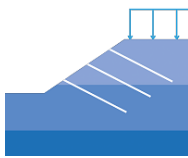
- Clous à l'abri d'une protection

La norme NF P 94-270 §F.2.3.3 impose les conditions suivantes :

- « Une gaine imperméable doit être mise en place en complément au coulis de scellement autour des clous en acier ordinaire lorsqu'ils sont installés dans un terrain présentant une force corrosive élevée si la catégorie de durée d'utilisation est supérieure à 2, et dans tous les cas si les conditions de sol sont hétérogènes »
- « L'espace annulaire entre la gaine et le clou doit être rempli d'un coulis de ciment ou de tout autre produit de scellement non agressif vis-à-vis de l'acier. »
- « Pour que le système soit efficace il est nécessaire que la gaine soit parfaitement étanche, donc continue jusqu'au parement, et obturée à la base. »
- « La manutention et la pose de clous protégés par des gaines doivent être réalisées avec soin de manière à éviter tout endommagement des gaines préjudiciable à la corrosion des clous. »
- « Dans tous les cas où les clous seraient constitués d'acier à haute limite élastique ($f_y > 500$ MPa), les dispositifs de protection des tirants d'ancrage précontraints doivent être appliqués (voir la norme NF EN 1537 et les recommandations nationales, dites T.A 95). »,
- « Pour les clous satisfaisant aux conditions énoncées ci-dessus, les coefficients $p_{deg;y}$ et $p_{deg;r}$ peuvent être pris égaux à 1.0. », ce qui revient à :

$$R_{t;dy} = (S_0 \cdot f_y / \gamma_{M0})$$

$$R_{t;dr} = (S_0 \cdot f_r / \gamma_{M2})$$



- Clous sans protection contre la corrosion

La norme NF P 94-270 §F.2.3.2 donne les valeurs de K , ΔS , γ_y ; γ_r à utiliser à défaut d'une étude spécifique.

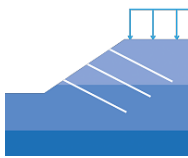
La diminution de la section d'acier ΔS se calcule par la relation :

$$\Delta S = (A \cdot t^n) \cdot \pi \cdot \emptyset$$

La norme NF P 94-270 §F.2.3.2 donne, des valeurs par défaut $K = 2.5$, $n = 0.65$ et A fonction de la force corrosive du sol :

Force corrosive	Faible	Moyenne	Elevée A ⁽¹⁾
A (μm)	25	37.5	50
⁽¹⁾ Pour des catégories d'utilisation ≤ 2.			

La norme donne également $\gamma_y = 1.5$ et $\gamma_r = 1.8$.



Annexe B – Module de réaction du sol

L'utilisation du multicritère pour les clous et épingles nécessite la connaissance de la pression limite PI et du module de réaction du sol K_s .

1) Au sens du Fascicule 62 – Titre V et NF P 94-262

Le module de réaction surfacique peut se déterminer selon l'annexe I.1.3 de la norme NF P 94-262 par la relation :

$$K_s = \frac{12.E_M}{\frac{4.B_0}{3.B} \cdot \left(2,65 \cdot \frac{B}{B_0}\right)^\alpha + \alpha} \quad , \text{lorsque } B \geq B_0$$

$$K_s = \frac{12.E_M}{\frac{4}{3} \cdot (2,65)^\alpha + \alpha} \quad , \text{lorsque } B \leq B_0$$

Avec :

- B Diamètre du clou
- B_0 une largeur de référence prise égale à 0,60 m
- E_m Module pressiométrique
- α Coefficient rhéologique du sol

Où α est caractérisé de la façon suivante :

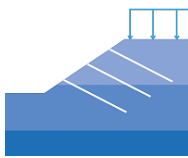
TYPE	Tourbe α	Argile		Limon		Sable		Grave	
		E_m/PI	α	E_m/PI	α	E_m/PI	α	E_m/PI	α
Surconsolidé ou très serré	-	>16	1	>14	2/3	>12	1/2	>10	1/3
Normalement consolidé	1	9-16	2/3	8-14	1/2	7-12	1/3	6-10	1/4
Sous-consolidé altéré et remanié ou lâche	-	7-9	1/2	5-8	1/2	5-7	1/3	-	-

Pour la roche, α est défini selon les valeurs suivantes :

- Très peu fracturé : $\alpha = 2/3$
- Normal : $\alpha = 1/2$
- Très fracturé : $\alpha = 1/3$
- Très altéré : $\alpha = 2/3$

Remarque : Le facteur 2 dans la formule provient de la longue durée des sollicitations (Article 4 du Fascicule 62 – Titre V ou annexe I.1.4 de la norme NF P 94-262).

2) Au sens de la norme NF P 94-282 (inclusions formant un écran continu)



Lorsque les inclusions modélisées forment un écran continu, le module de réaction peut être calculé conformément à l'expression générale donnée dans l'annexe F.3 de la norme NF P 94-282 :

- Dans le cas général :

$$k_h = 2 \frac{\left(\frac{E_M}{\alpha}\right)^{4/3}}{\left(\frac{E_{str} \cdot I_{str}}{B_0}\right)^{1/3}}$$

Avec :

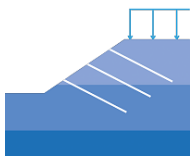
E_M : module pressiométrique

α : coefficient rhéologique, identique au tableau ci-dessus

$E_{str} \cdot I_{str}$: produit d'inertie de l'écran

B_0 : longueur de référence, prise égale à 1m

Cette valeur est éventuellement à majorer, en fonction des Notes 1 à 3 de l'annexe F3 de la norme NF P 94-282.



Annexe C – Coefficients de sécurité partiels

1) CLOUTERRE 91

ELS :

Aux Etats Limites de Service, tous les coefficients partiels de sécurité sont égaux à 1.

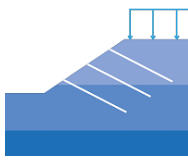
ELU :

Aux Etats Limites Ultimes, les valeurs proposées par CLOUTERRE 91 sont indiquées ci-dessous. Cependant l'utilisateur peut choisir d'autres coefficients.

Actions et résistances	Combinaison fondamentale			Combinaison accidentelle	
	ouvrage	Courant	Sensible	Courant	Sensible
Poids du sol					
* déstabilisateur	gamma	1,05	1,05	1	1
* stabilisateur	gamma	0,95	0,95	1	1
Cohésion effective	cohes	1,5	1,65	1,4	1,5
Cohésion non drainée	cohes	1,3	1,4	1,2	1,3
tan(phi)	tanfi	1,2	1,3	1,1	1,2
frottement latéral sol-clou					
* essai	frlat	1,4	1,5	1,3	1,4
* abagues	frlat	1,8	1,9	1,6	1,7
Pression limite	Plimi	1,9	2	1	1,1
Charge permanente					
* déstabilisatrice	charg	1,2	1,2	1	1
* stabilisatrice	charg	0,9	0,9	1	1
Charge variable	charg	1,33	1,33	1	1
Force permanente					
* déstabilisatrice	force	1,2	1,2	1	1
* stabilisatrice	force	0,9	0,9	1	1
Force variable	force	1,33	1,33	1	1
Limite élastique acier clou	acier	1,15	1,15	1	1
Limite résistance géotextile	armgt				
Limite élastique armature TA	armta				
Coefficient de méthode	metho	1,125	1,125	1	1

2) EUROCODES 7

Les calculs peuvent être effectués selon la norme d'application nationale NF P 94 270 de l'Eurocode 7, les jeux de coefficients partiels correspondants sont donnés dans les tableaux ci-dessous. Les valeurs des facteurs partiels y sont fonction de l'approche de calcul retenue :



- L'approche de calcul 2 est utilisée pour la vérification des états limites de stabilité externe (GEO) et de stabilité interne (STR). La combinaison à appliquer est :

$$A1 + M1 + R2$$

- L'approche de calcul 3 est utilisée pour la vérification des états limites de stabilité générale (GEO) et de stabilité mixte (GEO et STR). La combinaison de facteurs partiels à appliquer est :

$$(A1 \text{ ou } A2) + M2 + R3$$

- L'approche de calcul 1 est également incluse dans GeoStab. Les combinaisons de facteurs partiels utilisés sont les suivants :

- Combinaison 1 : $A1 + M1 + R1$
- Combinaison 2 : $A2 + M2 + R1$

- Facteurs partiels pour les actions :

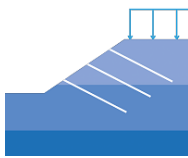
Action		Symbole	A1	A2
Permanente	Défavorable	$\gamma_{G_{sup}}$	1,35	1,0
	Favorable	$\gamma_{G_{inf}}$	1,0	1,0
Variable	Défavorable	$\gamma_{Q_{sup}}$	1,5	1,3
	Favorable	$\gamma_{Q_{inf}}$	0	0

- Facteurs partiels pour les paramètres des sols :

Paramètres du sol	Symbole	M1	M2
Angle de frottement interne	$\gamma_{\phi'}$	1,0	1,25
Cohésion effective	$\gamma_{c'}$	1,0	1,25
Cohésion non drainée	γ_{cu}	1,0	1,4
Compression simple	γ_{qu}	1,0	1,4
Poids volumique	γ_{γ}	1,0	1,0
Pression limite sol	γ_{pl}	1,0	1,4

- Facteurs partiels pour les paramètres des éléments de renforcement :

Propriété		Symbole	M1 ^(a)	M2 ^(b)
Renforcements métalliques	Limite d'élasticité	γ_{M0}	1,0	1,0
	Rupture en traction	γ_{M2}	1,25	1,25
Renforcements géo-synthétiques	Résistance en traction caractéristique	$\gamma_{M,t}$	1,25	1,25
Résistance d'interaction sol-lit de renforcement	μ adhérence ^(c) tiré d'une base de données documentée	$\gamma_{M,f}$	1,35	1,1



	$q_s^{(d)}$ déduit d'essais d'arrachement	$\gamma_{M,f}$	1,4	1,1
(a) Stabilité interne (b) Stabilité mixte (c) Interaction sol-renforcement $\tau_{\max}$ pour les ouvrages en remblai renforcé (d) Interaction terrain-clou $\tau_{\max}$ pour les massifs cloués				

- Facteurs partiels pour la résistance des parements :

Pour la vérification structurelle (STR) du parement d'un ouvrage en sol renforcé les dispositions de la norme de calcul appropriée au matériau constitutif du parement s'appliquent avec les facteurs partiels recommandés.

- Facteurs partiels pour les résistances géotechniques
 - pour la vérification de la stabilité externe des ouvrages en sol renforcé :

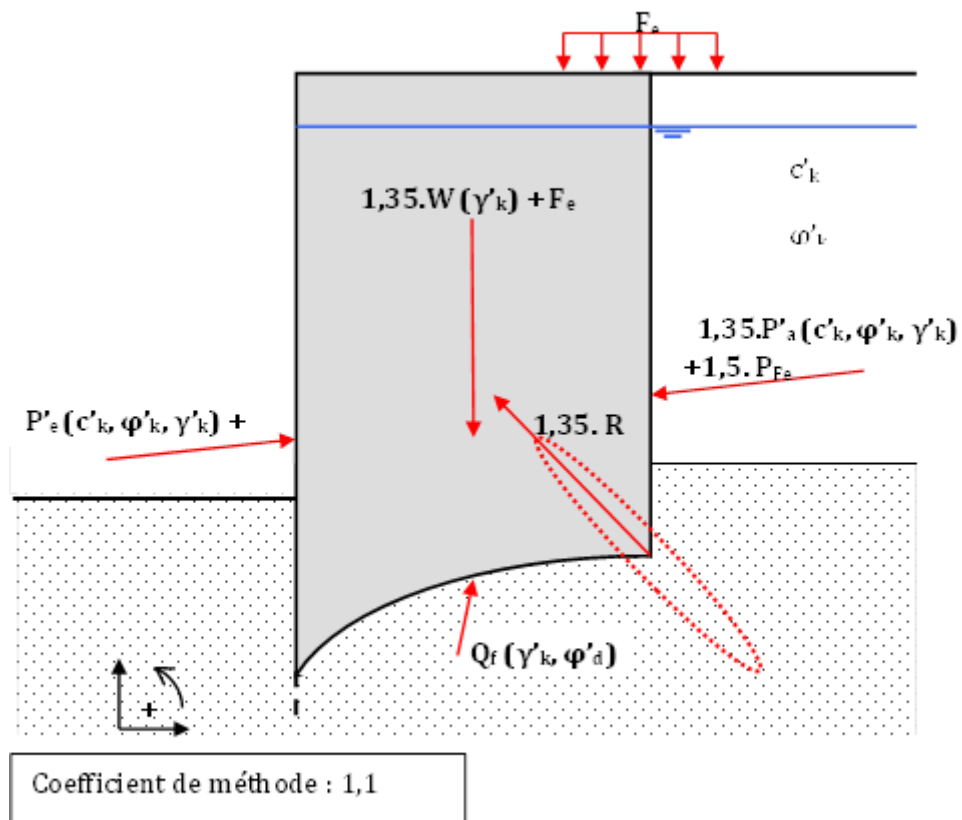
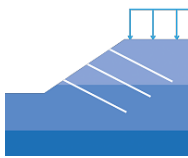
	Résistance	Symbole	R1	R2
Stabilité externe	Portance	$\gamma_{R,v}$	1,0	1,4
	Résistance au glissement	$\gamma_{R,h}$	1,0	1,1

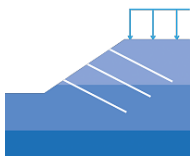
- pour la vérification de la stabilité mixte et de la stabilité générale des ouvrages en sol renforcé :

	Résistance	Symbole	R1	R3
Stabilité mixte et générale	Résistance globale au cisaillement sur une surface de rupture	$\gamma_{R,e}$	1,0	1,0

Note :

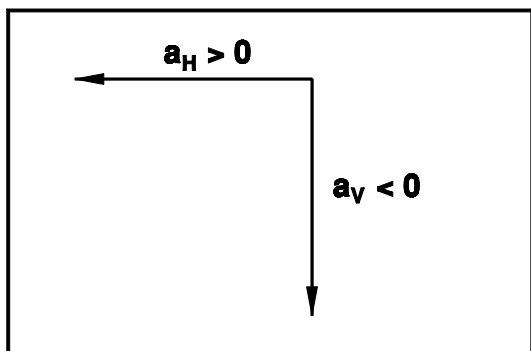
Coefficients partiels à l'Eurocode 7, Approche 2, pour la méthode de Kranz



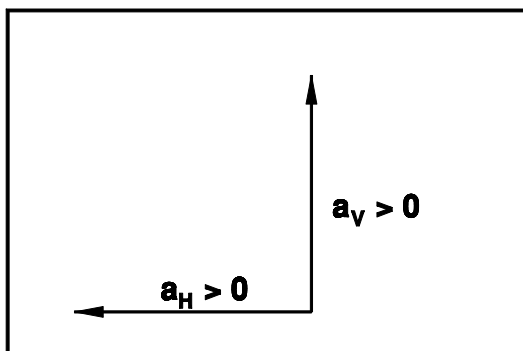


Annexe D – Accélérations sismiques

Le calcul de l'action sismique s'effectue par la méthode statique équivalente. D'après l'AFPS 90, deux combinaisons d'accélération sont à étudier :



COMBINAISON A



COMBINAISON B

Pour connaître la valeur de l'accélération, l'utilisateur peut se référer à l'AFPS 90 ou à la NF P 1998-5 :

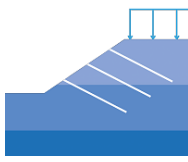
§ 9.2 Tome 1 pour les stabilités de pente

§16.4 Tome 2 pour les ouvrages ancrés

Ou à la NF EN 1998-5 :

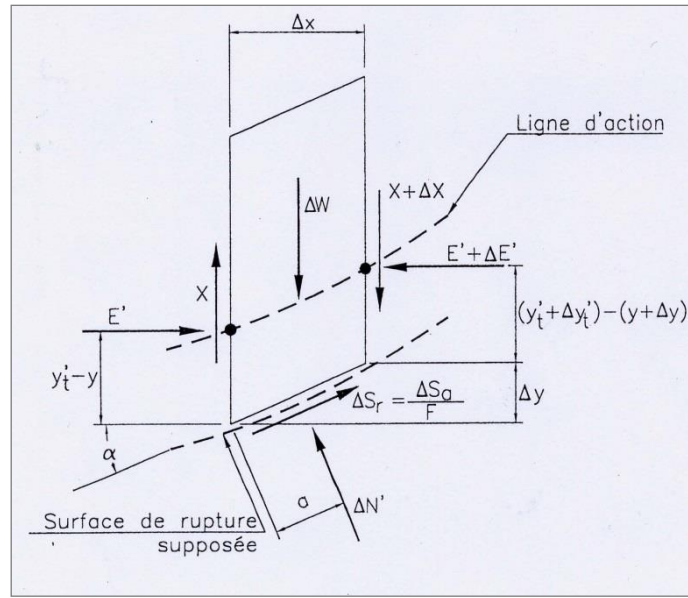
$$\S 7.3.2.2 : \sigma_h = \frac{1}{r} a_{gr} \gamma_l \frac{S}{g} \text{ et } \sigma_v = \pm 0,5 \sigma_h \text{ (ouvrages de soutènement)}$$

$$\S 4.1.3.3 : \sigma_h = 0.5 a_{gr} \gamma_l \frac{S}{g} \text{ et } \sigma_v = \pm 0,5 \sigma_h \text{ (stabilité des pentes)}$$



Annexe E – Développement de la méthode de Carter

Les forces appliquées à chaque tranche sont définies sur la Figure suivante :



Equilibre des moments par rapport au point 0 pour l'ensemble des tranches :

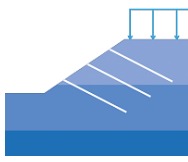
$$\sum_1^n [(\Delta N' + \Delta U_\alpha) \cdot (\bar{y} \cdot \sin \alpha - \bar{x} \cdot \cos \alpha) + \Delta U_\beta \cdot (\bar{x} \cdot \cos \beta - (\bar{y} - h) \cdot \sin \beta) + \Delta Q \cdot (\bar{x} \cdot \cos \delta - (\bar{y} - h) \cdot \sin \delta) + \Delta W \cdot (1 - k_v) \cdot \bar{x} + k_h \cdot \Delta W \cdot (\bar{y} - h_{eq}) + \Delta S_r \cdot (\bar{x} \cdot \sin \alpha + \bar{y} \cdot \cos \alpha)] = 0 \quad (1)$$

Equilibre des forces verticales pour la tranche :

$$(\Delta N' + \Delta U_\alpha) \cos \alpha + \Delta S_r \cdot \sin \alpha + \Delta X - \Delta W \cdot (1 - k_v) - \Delta U_\beta \cdot \cos \beta - \Delta Q \cdot \cos \delta = 0 \quad (2)$$

Expression de la force de cisaillement mobilisée à la base de la tranche :

$$\Delta S_r = \frac{\Delta C'_a + \Delta N' \cdot \tan \phi'_a}{F} \quad (3)$$



Remplacement de ΔS_r dans l'équation (1) par son expression donnée dans l'équation (3) :

$$\sum_{i=1}^n [F. (\Delta N' + \Delta U_{\alpha}). (\bar{y}. \sin \alpha - \bar{x}. \cos \alpha) + F. \Delta U_{\beta}. (\bar{x}. \cos \beta - (\bar{y} - h). \sin \beta) + F. \Delta Q. (\bar{x}. \cos \delta - (\bar{y} - h). \sin \delta) + F. \Delta W. (1 - k_v). \bar{x} + F. k_h. \Delta W. (\bar{y} - h_{eq}) - (\Delta C'_{\alpha} + \Delta N' \tan \phi'_{\alpha}). (\bar{x}. \sin \alpha + \bar{y}. \cos \alpha)] = 0 \quad (4)$$

Remplacement de ΔS_r dans l'équation (2) par son expression donnée dans l'équation (3) et expression de $\Delta N'$ pour une tranche :

$$F. (\Delta N' + \Delta U_{\alpha}). \cos \alpha + (\Delta C'_{\alpha} + \Delta N' \tan \phi'_{\alpha}). \sin \alpha + F. \Delta X - F. \Delta W (1 - k_v) - F. \Delta U_{\beta}. \cos \beta - F. \Delta Q. \cos \delta = 0 \quad (5)$$

$$\Delta N'. (F. \cos \alpha + \tan \phi'_{\alpha}. \sin \alpha) = -\Delta C'_{\alpha}. \sin \alpha + F. [-\Delta X + \Delta W (1 - k_v) + \Delta U_{\beta}. \cos \beta + \Delta Q. \cos \delta - \Delta U_{\alpha}. \cos \alpha] \quad (6)$$

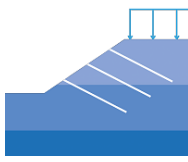
$$\Delta N' = \frac{-\Delta C'_{\alpha}. \sin \alpha + F. [-\Delta X + \Delta W. (1 - k_v) + \Delta U_{\beta}. \cos \beta + \Delta Q. \cos \delta - \Delta U_{\alpha}. \cos \alpha]}{F. \cos \alpha + \tan \phi'_{\alpha}. \sin \alpha} \quad (7)$$

Mise en facteur de $\Delta N'$ dans l'équation (4) :

$$\sum_1^n \{ \Delta N'. [F(\bar{y}. \sin \alpha - \bar{x}. \cos \alpha) - \tan \phi'_{\alpha} (\bar{x}. \sin \alpha - \bar{y}. \cos \alpha)] + F. \Delta U_{\alpha}. (\bar{y}. \sin \alpha - \bar{x}. \cos \alpha) + F. \Delta U_{\beta}. (\bar{x}. \cos \beta - (\bar{y} - h). \sin \beta) + F. \Delta Q. (\bar{x}. \cos \delta - (\bar{y} - h). \sin \delta) + F. \Delta W. (1 - k_v). \bar{x} + F. \Delta W. k_h. (\bar{y} - h_{eq}) - \Delta C'_{\alpha}. (\bar{x}. \sin \alpha + \bar{y}. \cos \alpha) \} = 0 \quad (8)$$

Remplacement de $\Delta N'$ dans l'équation (8) par son expression dans l'équation (7) :

$$\sum_1^n \left\{ \frac{-\Delta C'_{\alpha}. \sin \alpha + F. [\Delta W. (1 - k_v) + \Delta U_{\beta}. \cos \beta + \Delta Q. \cos \delta - \Delta U_{\alpha}. \cos \alpha]}{F. \cos \alpha + \tan \phi'_{\alpha}. \sin \alpha} + F. \Delta U_{\alpha}. (\bar{y}. \sin \alpha - \bar{x}. \cos \alpha) + F. \Delta U_{\beta}. (\bar{x}. \cos \beta - (\bar{y} - h). \sin \beta) + F. \Delta Q. (\bar{x}. \cos \delta - (\bar{y} - h). \sin \delta) + F. \Delta W. (1 - k_v). \bar{x} + F. \Delta W. k_h. (\bar{y} - h_{eq}) - \Delta C'_{\alpha}. (\bar{x}. \sin \alpha + \bar{y}. \cos \alpha) \right\} = 0 \quad (9.1)$$



$$\sum_1^n \left\{ \frac{F \cdot \Delta X}{F \cdot \cos \alpha + \tan \phi'_a \cdot \sin \alpha} \cdot x \cdot [F \cdot (\bar{y} \cdot \sin \alpha - \bar{x} \cdot \cos \alpha) - \tan \phi'_a (\bar{x} \cdot \sin \alpha - \bar{y} \cdot \cos \alpha)] \right\} \quad (9.2)$$

$$= \Delta X \frac{F \cdot (\bar{y} \cdot \sin \alpha - \bar{x} \cdot \cos \alpha) - \tan \phi'_a (\bar{x} \cdot \sin \alpha - \bar{y} \cdot \cos \alpha)}{\cos \alpha + \sin \alpha \cdot \frac{\tan \phi'_a}{F}} \quad (9.3)$$

$$= \Delta X \cdot \bar{y} \cdot \frac{F \cdot \left(\sin \alpha - \frac{\bar{x}}{\bar{y}} \cdot \cos \alpha \right) - \tan \phi'_a \left(\frac{\bar{x}}{\bar{y}} \cdot \sin \alpha - \cos \alpha \right)}{\cos \alpha + \sin \alpha \cdot \frac{\tan \phi'_a}{F}} \quad (9.4)$$

$$= \Delta X \cdot \bar{y} \cdot \frac{F \cdot \left(\tan \alpha - \frac{\bar{x}}{\bar{y}} \right) - \tan \phi'_a \left(\frac{\bar{x}}{\bar{y}} \cdot \tan \alpha + 1 \right)}{1 + \tan \alpha \cdot \frac{\tan \phi'_a}{F}} \quad (9.5)$$

$$= \Delta X \cdot \bar{y} \cdot \frac{\frac{\bar{x}}{\bar{y}} \cdot (-\tan \phi'_a \cdot \tan \alpha - F) + F \cdot \tan \alpha - \tan \phi'_a}{1 + \tan \alpha \cdot \frac{\tan \phi'_a}{F}} \quad (9.6)$$

$$= \Delta X \cdot \bar{y} \cdot \frac{-F \cdot \frac{\bar{x}}{\bar{y}} \cdot \left(1 + \frac{\tan \phi'_a \cdot \tan \alpha}{F} \right) + F \cdot \tan \alpha - \tan \phi'_a}{1 + \tan \alpha \cdot \frac{\tan \phi'_a}{F}} \quad (9.7)$$

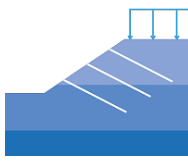
$$= \Delta X \cdot \bar{y} \cdot F \cdot \left[\frac{\frac{\tan \phi'_a \cdot \tan \alpha}{F}}{1 + \tan \alpha \cdot \frac{\tan \phi'_a}{F}} - \frac{\bar{x}}{\bar{y}} \right] \quad (9.8)$$

Termes en $\Delta C'_a$

$$-\Delta C'_a \left\{ \frac{\sin \alpha}{F \cdot \cos \alpha + \tan \phi'_a \cdot \sin \alpha} \cdot [F \cdot (\bar{y} \cdot \sin \alpha - \bar{x} \cdot \cos \alpha) - \tan \phi'_a (\bar{x} \cdot \sin \alpha + \bar{y} \cdot \cos \alpha)] + (\bar{x} \cdot \sin \alpha + \bar{y} \cdot \cos \alpha) \right\} = \quad (C-1)$$

$$-\Delta C'_a \cdot \frac{1}{\frac{F}{\tan \alpha} + \tan \phi'_a} \cdot [F \cdot (\bar{y} \cdot \sin \alpha - \bar{x} \cdot \cos \alpha) - \tan \phi'_a (\bar{x} \cdot \sin \alpha + \bar{y} \cdot \cos \alpha)] + (\bar{x} \cdot \sin \alpha + \bar{y} \cdot \cos \alpha) = \quad (C-2)$$

$$-\Delta C'_a \cdot \frac{\tan \alpha}{F + \tan \alpha \cdot \tan \phi'_a} \cdot \left[F \cdot (\bar{y} \cdot \sin \alpha - \bar{x} \cdot \cos \alpha) - \tan \phi'_a (\bar{x} \cdot \sin \alpha + \bar{y} \cdot \cos \alpha) + (\bar{x} \cdot \sin \alpha + \bar{y} \cdot \cos \alpha) \cdot \frac{F + \tan \alpha \cdot \tan \phi'_a}{\tan \alpha} \right] = \quad (C-3)$$



$$\begin{aligned} & \frac{-\Delta C'_a}{\cos \alpha \cdot (F + A3)} \cdot [F \cdot \sin \alpha \cdot (\bar{y} \cdot \sin \alpha - \bar{x} \cdot \cos \alpha) - \sin \alpha \cdot \tan \phi'_a \cdot (\bar{x} \cdot \sin \alpha + \bar{y} \cdot \cos \alpha) \\ & \quad + \cos \alpha \cdot (\bar{x} \cdot \sin \alpha + \bar{y} \cdot \cos \alpha) \cdot (F + \tan \alpha \cdot \tan \phi'_a)] = \\ & \frac{-\Delta C'_a}{\cos \alpha \cdot (F + A3)} \cdot \bar{y} \cdot [F \cdot \sin^2 \alpha - F \cdot \frac{\bar{x}}{\bar{y}} \cdot \sin \alpha \cdot \cos \alpha - \frac{\bar{x}}{\bar{y}} \cdot \sin^2 \alpha \cdot \tan \phi'_a - \sin \alpha \cdot \cos \alpha \cdot \tan \phi'_a \\ & \quad + \frac{\bar{x}}{\bar{y}} \cdot \sin \alpha \cdot \cos \alpha \cdot F + F \cdot \cos^2 \alpha + \cos \alpha \cdot \frac{\bar{x}}{\bar{y}} \cdot \sin \alpha \cdot \tan \alpha \cdot \tan \phi'_a \\ & \quad + \cos^2 \alpha \cdot \tan \alpha \cdot \tan \phi'_a] = \\ & - \frac{F \Delta C'_a}{\cos \alpha \cdot (F + A3)} \cdot y \end{aligned}$$

Autres termes :

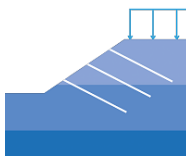
$$\begin{aligned} & F \cdot [\Delta W(1 - k_v) + \Delta U_\beta \cdot \cos \delta + \Delta Q \cdot \cos \delta - \Delta U_\alpha \cdot \cos \alpha] \cdot \cos \alpha \cdot (F \cdot \tan \phi'_a \cdot \tan \alpha) \\ & + [F \cdot (\bar{y} \cdot \sin \alpha - \bar{x} \cdot \cos \alpha) - \tan \phi'_a \cdot (\bar{x} \cdot \sin \alpha - \bar{y} \cdot \cos \alpha)] \\ & + F \cdot \Delta U_\alpha \cdot (\bar{y} \cdot \sin \alpha - \bar{x} \cdot \cos \alpha) \\ & + F \cdot \Delta U_\beta \cdot (\bar{x} \cdot \cos \beta - (\bar{y} - h) \cdot \sin \beta) \\ & + F \cdot \Delta Q \cdot (\bar{x} \cdot \cos \delta - (\bar{y} - h) \cdot \sin \delta) \\ & + F \cdot \Delta W \cdot [(1 - k_v) \cdot \bar{x} + k_h(\bar{y} - h_{eq})] = \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \frac{F}{F + A3} \cdot \left\{ \frac{1}{\cos \alpha} \cdot [\Delta W(1 - k_v) + \Delta U_\beta \cdot \cos \beta + \Delta Q \cdot \cos \delta - \Delta U_\alpha \cdot \cos \alpha] \cdot x \right. \\ & + [F \cdot (\bar{y} \cdot \sin \alpha - \bar{x} \cdot \cos \alpha) - \tan \phi'_a \cdot (\bar{x} \cdot \sin \alpha - \bar{y} \cdot \cos \alpha)] \\ & + \Delta U_\alpha \cdot (\bar{y} \cdot \sin \alpha - \bar{x} \cdot \cos \alpha) \cdot (F + \tan \phi'_a \cdot \tan \alpha) \\ & + F \cdot \Delta U_\beta \cdot (\bar{x} \cdot \cos \beta - (\bar{y} - h) \cdot \sin \beta) \cdot (F + \tan \phi'_a \cdot \tan \alpha) \\ & + F \cdot \Delta Q \cdot (\bar{x} \cdot \cos \delta - (\bar{y} - h) \cdot \sin \delta) \cdot (F + \tan \phi'_a \cdot \tan \alpha) \\ & \left. + F \cdot \Delta W \cdot [(1 - k_v) \cdot \bar{x} + k_h(\bar{y} - h_{eq})] \cdot (F + \tan \phi'_a \cdot \tan \alpha) \right\} = \end{aligned}$$

$$\frac{F}{F + A3} \cdot [B1 + B2]$$

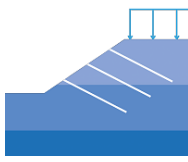
Avec :

- B₁ termes en ϕ'_a
- B₂ termes en F



Termes en ϕ'_a

$$\begin{aligned}
 B1 &= \tan\phi'_a \cdot \left\{ -\frac{\Delta W}{\cos\alpha} \cdot (1 - k_v) \cdot (\bar{x} \cdot \sin\alpha + \bar{y} \cdot \cos\alpha) \right. \\
 &\quad + \Delta W \cdot \tan\alpha \cdot [(1 - k_v) \cdot \bar{x} + k_h(\bar{y} - h_{eq})] \\
 &\quad - \Delta U_\beta \cdot \frac{\cos\beta}{\cos\alpha} \cdot (\bar{x} \cdot \sin\alpha + \bar{y} \cdot \cos\alpha) \\
 &\quad + \Delta U_\beta \cdot \tan\alpha \cdot (\bar{x} \cdot \cos\beta - (\bar{y} - h) \cdot \sin\beta) \\
 &\quad + \Delta U_\alpha \cdot \frac{\cos\alpha}{\cos\alpha} \cdot (\bar{x} \cdot \sin\alpha + \bar{y} \cdot \cos\alpha) \\
 &\quad + \Delta U_\alpha \cdot \tan\alpha \cdot (\bar{y} \cdot \sin\alpha - \bar{x} \cdot \cos\alpha) \\
 &\quad - \Delta Q \cdot \frac{\cos\delta}{\cos\alpha} \cdot (\bar{x} \cdot \sin\alpha + \bar{y} \cdot \cos\alpha) \\
 &\quad \left. + \Delta Q \cdot \tan\alpha \cdot (\bar{x} \cdot \cos\delta - (\bar{y} - h) \cdot \sin\delta) \right\} \\
 \\
 &= \bar{y} \cdot \tan\phi'_a \cdot \left\{ \Delta W \left[-(1 - k_v) \cdot \left(\tan\alpha \cdot \frac{\bar{x}}{\bar{y}} + 1 \right) + (1 - k_v) \cdot \tan\alpha \cdot \frac{\bar{x}}{\bar{y}} + \tan\alpha \cdot k_h \cdot \left(1 - \frac{h_{eq}}{\bar{y}} \right) \right] \right. \\
 &\quad + \Delta U_\beta \cdot \left[\tan\alpha \cdot \cos\beta \cdot \frac{\bar{x}}{\bar{y}} - \tan\alpha \cdot \sin\beta \cdot \left(1 - \frac{h}{\bar{y}} \right) - \cos\beta \cdot \tan\alpha \cdot \frac{\bar{x}}{\bar{y}} - \cos\beta \right] \\
 &\quad + \Delta U_\alpha \cdot \left[\tan\alpha \cdot \sin\alpha - \cos\alpha \cdot \tan\alpha \cdot \frac{\bar{x}}{\bar{y}} + \sin\alpha \cdot \frac{\bar{x}}{\bar{y}} + \cos\alpha \right] \\
 &\quad \left. + \Delta Q \cdot \left[\tan\alpha \cdot \cos\delta \cdot \frac{\bar{x}}{\bar{y}} - \tan\alpha \cdot \sin\delta \cdot \left(1 - \frac{h}{\bar{y}} \right) - \frac{\cos\delta}{\cos\alpha} \cdot \sin\alpha \cdot \frac{\bar{x}}{\bar{y}} - \frac{\cos\delta}{\cos\alpha} \cdot \cos\alpha \right] \right\} \\
 \\
 &= \bar{y} \cdot \tan\phi'_a \cdot \left\{ -\Delta W \cdot \left[(1 - k_v) - k_h \cdot \left(1 - \frac{h_{eq}}{\bar{y}} \right) \right] \cdot \tan\alpha \right. \\
 &\quad - \Delta U_\beta \cdot \left[\cos\beta + \tan\alpha \cdot \sin\beta \cdot \left(1 - \frac{h}{\bar{y}} \right) \right] \\
 &\quad + \Delta U_\alpha \cdot \left[\frac{\sin^2\alpha}{\cos\alpha} + \cos\alpha \right] \\
 &\quad \left. - \Delta Q \cdot \left[\cos\delta + \tan\alpha \cdot \sin\delta \cdot \left(1 - \frac{h}{\bar{y}} \right) \right] \right\} \\
 \\
 &= -\bar{y} \cdot \tan\phi'_a \cdot \left\{ +\Delta W \cdot \left[-k_h \cdot \left(1 - \frac{h_{eq}}{\bar{y}} \right) \cdot \tan\alpha + (1 - k_v) \right] \right. \\
 &\quad \left. + \Delta U_\beta \cdot \left[\cos\beta + \tan\alpha \cdot \sin\beta \cdot \left(1 - \frac{h}{\bar{y}} \right) \right] \right\}
 \end{aligned}$$



$$\begin{aligned}
 & -\frac{\Delta U_{\alpha}}{\cos \alpha} \\
 & +\Delta Q \cdot \left[\cos \delta + \tan \alpha \cdot \sin \delta \cdot \left(1 - \frac{h}{y} \right) \right] \\
 & = -\bar{y} \cdot \tan \phi'_{\alpha} = B1
 \end{aligned}$$

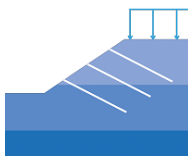
Termes en F

$$\begin{aligned}
 B2 &= F \cdot \left\{ \frac{\Delta W}{\cos \alpha} \cdot (1 - k_v) \cdot (\bar{y} \cdot \sin \alpha - \bar{x} \cdot \cos \alpha) \right. \\
 & + \Delta W \cdot [(1 - k_v) \cdot \bar{x} + k_h \cdot (\bar{y} - h_{eq})] \\
 & + \Delta U_{\beta} \cdot \frac{\cos \beta}{\cos \alpha} \cdot (\bar{y} \cdot \sin \alpha - \bar{x} \cdot \cos \alpha) \\
 & + \Delta U_{\beta} \cdot [\bar{x} \cdot \cos \beta - (\bar{y} - h) \cdot \sin \beta] \\
 & + \Delta U_{\alpha} \cdot \frac{\cos \alpha}{\cos \alpha} \cdot (\bar{y} \cdot \sin \alpha - \bar{x} \cdot \cos \alpha) \\
 & + \Delta U_{\alpha} \cdot (\bar{y} \cdot \sin \alpha - \bar{x} \cdot \cos \alpha) \\
 & + \Delta Q \cdot \frac{\cos \delta}{\cos \alpha} \cdot (\bar{y} \cdot \sin \alpha - \bar{x} \cdot \cos \alpha) \\
 & \left. + \Delta Q \cdot [\bar{x} \cdot \cos \delta - (\bar{y} - h) \cdot \sin \delta] \right\} \\
 & = \bar{y} \cdot F \cdot \left\{ \Delta W \cdot \left[(1 - k_v) \cdot \tan \alpha - (1 - k_v) \cdot \frac{\bar{x}}{\bar{y}} + k_h \cdot \left(1 - \frac{h_{eq}}{\bar{y}} \right) \right] \right. \\
 & + \Delta U_{\beta} \cdot \left[\cos \beta \cdot \tan \alpha - \sin \beta \cdot \left(1 - \frac{h}{\bar{y}} \right) \right] \\
 & + \Delta Q \cdot \left[\cos \beta \cdot \tan \alpha - \sin \delta \cdot \left(1 - \frac{h}{\bar{y}} \right) \right] \left. \right\} \\
 & = \bar{y} \cdot F \cdot A2
 \end{aligned}$$

1^{er} membre :

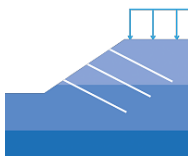
$$\sum_1^n -\frac{F \cdot \Delta C'_{\alpha}}{\cos \alpha \cdot (F + A3)} \cdot \bar{y} + \frac{F}{(F + A3)} \cdot [-\bar{y} \cdot \tan \phi'_{\alpha} \cdot b1 + \bar{y} \cdot F \cdot A2] = \sum_1^n -F \cdot \bar{y} \cdot \left[\frac{\frac{\Delta C'_{\alpha}}{\cos \alpha} + \frac{\tan \phi'_{\alpha}}{F} \cdot \bar{x}}{1 + \frac{\tan \alpha \cdot \tan \phi'_{\alpha}}{F} \cdot \frac{\bar{x}}{\bar{y}}} \right]$$

Avec $A_3 = \tan \alpha \cdot \tan \phi'_{\alpha}$



2^{ème} membre :

$$\sum_1^n F \cdot \bar{y} \cdot \Delta X \cdot \left[\frac{\tan \alpha - \frac{\tan \phi'_a}{F}}{1 + \frac{\tan \alpha \cdot \tan \phi'_a}{F}} \cdot \frac{\bar{x}}{\bar{y}} \right] = \sum_1^n \bar{y} \cdot \left[\frac{A1 - F \cdot A2}{F + A3} \right] = \sum_1^n \bar{y} \cdot \Delta X \cdot A4$$



Annexe F – Développement de la méthode des perturbations

1) Equations générales

a. Equation fondamentale de stabilité

L'introduction du facteur de stabilité calculé par GeoStab se fait par la relation :

$$\Gamma \cdot \Gamma_{S3} \cdot \tau = \tau_{max} \quad (1)$$

Avec :

- τ : contrainte tangentielle le long de la surface de rupture (fonction des actions)
- τ_{max} : contrainte tangentielle maximale mobilisable (fonction des paramètres)
- Γ : facteur de stabilité vis-à-vis de la stabilité
- Γ_{S3} : coefficient de méthode

b. Critère de Coulomb

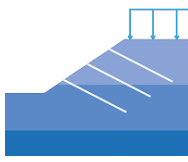
Dans l'équation (1), τ_{max} peut se calculer selon la loi de Coulomb :

$$\tau \frac{c'}{\Gamma_c} \frac{\tan \phi'}{\Gamma_\phi} = \tau_{max} \quad (2)$$

Avec :

- c' : cohésion du sol au niveau de la surface de rupture
- Γ_c : coefficient partiel de sécurité pris sur la cohésion
- σ : contrainte normale le long de la surface de rupture
- ϕ' : angle de frottement du sol au niveau de la surface de rupture
- Γ_ϕ : coefficient partiel de sécurité pris sur l'angle de frottement

a. Equations d'équilibre d'une tranche d'épaisseur dx (cf. figure 3 des considérations théoriques)



En discrétisant le volume de sol, au-dessus de la surface calculée, en tranches d'épaisseur dx , il vient, à partir du bilan des forces du paragraphe 2.2 :

- Suivant l'horizontale :

$$-dU - dE' + \tau \cdot dS \cdot \cos \alpha - \sigma \cdot dS \cdot \sin \alpha = 0 \quad (3a)$$

- Suivant la verticale :

$$-dT - \Gamma_\gamma \cdot \gamma \cdot h \cdot dx + \tau \cdot dS \cdot \sin \alpha + \sigma \cdot dS \cdot \cos \alpha = 0 \quad (3b)$$

Avec $dS = \frac{dx}{\cos \alpha}$ (tranches de largeur 1 m), il vient :

$$-dU - dE' + \tau \cdot dx - \sigma \cdot dx \cdot \tan \alpha = 0 \quad (4a)$$

$$-dT - \Gamma_\gamma \cdot \gamma \cdot h \cdot dx + \tau \cdot dx \cdot \tan \alpha + \sigma \cdot dx = 0 \quad (4b)$$

Où :

- dU est la poussée horizontale due à l'eau
- dE' est la composante horizontale des forces effectives intertranches
- dT est la composante verticale des forces intertranches
- α est l'angle entre la base de la tranche et l'horizontale
- dS est la surface de la base de la tranche, d'épaisseur 1 m, de hauteur h et de largeur 1
- $\gamma \cdot h \cdot dx$ est le poids total de la tranche de sol
- Γ_γ est le coefficient de sécurité partiel pris pour le poids des sols

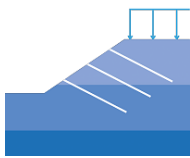
b. Ecriture des moments au point O de l'ensemble du glissement potentiel

Pour l'ensemble des tranches dont les efforts sont modélisés au paragraphe 3.3, l'équation des moments peut s'écrire :

$$\int_{x_0}^{x_1} [y \cdot (\tau - \sigma \cdot \tan \alpha) + x \cdot (\Gamma_\gamma \cdot \gamma \cdot h - \tau \cdot \tan \alpha - \sigma)] \cdot dx + \int_{x_0}^{x_1} (-y \cdot dU - y \cdot dE' + x \cdot dT) + M_{add} = 0$$

Avec :

- M_{add} : l'ensemble des moments extérieurs au volume considéré



- x : l'abscisse du milieu de la base d'une tranche
- y : l'ordonnée du milieu de la base d'une tranche

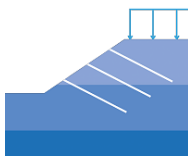
a. Relevé des inconnues et conclusions

Le tableau suivant montre, pour chaque équation, les paramètres connus et inconnus :

	Paramètres connus	Remarques	Paramètres inconnus	Remarques
(1)	Γ_{S3}	défini par l'utilisateur (normes, ...)	Γ	
			τ	
			$\tau_{\max}$	
(2)	c'	défini par l'utilisateur	$\tau_{\max}$	
	Γ_c	défini par l'utilisateur		
	ϕ'	défini par l'utilisateur	σ	
	Γ_ϕ	défini par l'utilisateur		
(4a)	dU	défini par la différence de hauteur d'eau entre 2 tranches	dE'	
	α		τ	
			σ	
(4b)	Γ_y	défini par l'utilisateur	dT	
	γ	défini par l'utilisateur	τ	
	h		σ	
	α			
(5)	$x_0 ; x_1$	intersection surface calculée / TN	τ	
	$x ; y$	point milieu de la base de la tranche		
	α		σ	
	Γ_y			
	γ		dT	∫dT correspond à la somme des composantes verticales des surcharges dans le volume considéré
	h			
	dU		dE'	∫dE' correspond à la somme des composantes horizontales des surcharges dans le volume considéré

On a donc 5 équations, pour 6 inconnues (dE' , dT , τ , σ , $\tau_{\max}$ et Γ). Le système est hyperstatique, et il faut une hypothèse supplémentaire pour pouvoir le résoudre.

2) Hypothèse de Fellenius



a. Introduction

La substitution du paramètre τ dans les équations (4a) et (4b) est possible. On obtient alors, d'après (4a) :

$$\tau \cdot dx = dU + dE' + \sigma \cdot \tan \alpha \cdot dx \quad (6)$$

Soit, dans (4b) :

$$-dT - \Gamma_\gamma \cdot \gamma \cdot h \cdot dx + (dU + dE' + \sigma \cdot \tan \alpha \cdot dx) \cdot \tan \alpha + \sigma \cdot dx = 0$$

En développant,

$$-dT - \Gamma_\gamma \cdot \gamma \cdot h \cdot dx + dU \cdot \tan \alpha + dE' \cdot \tan \alpha + \sigma \cdot (\tan \alpha)^2 \cdot dx + \sigma \cdot dx = 0 \quad (7)$$

En isolant σ dans (7), il vient :

$$\sigma = \frac{\frac{dT}{dx} \frac{dE'}{dx} \tan \alpha + \Gamma_\gamma \cdot \gamma \cdot h \frac{dU}{dx} \tan \alpha}{(1 + (\tan \alpha)^2)} \quad (8)$$

b. Hypothèse de Fellenius

La méthode de Fellenius impose :

$$dT = dE' \cdot \tan \alpha. \quad (9)$$

L'équation (8) devient alors :

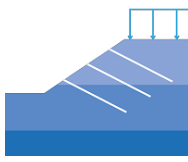
$$\sigma_{Fel} = \frac{\Gamma_\gamma \cdot \gamma \cdot h \frac{dU}{dx} \tan \alpha}{(1 + (\tan \alpha)^2)} \quad (10)$$

En outre, les équations trigonométriques donnent :

$$\begin{aligned} \frac{1}{(1 + (\tan \alpha)^2)} &= \frac{1}{(\cos \alpha)^2 + (\sin \alpha)^2 + \frac{(\sin \alpha)^2}{(\cos \alpha)^2}} \\ &= \frac{(\cos \alpha)^2}{(\cos \alpha)^4 + (\sin \alpha)^2 \cdot (\cos \alpha)^2 + (\sin \alpha)^2} \end{aligned}$$

Avec : $(\cos \alpha)^4 + (\sin \alpha)^2 \cdot (\cos \alpha)^2 + (\sin \alpha)^2 = (\cos \alpha)^4 + (1 - (\cos \alpha)^2) \cdot (\cos \alpha)^2 + (\sin \alpha)^2$

$$\begin{aligned} &= (\cos \alpha)^4 + (\cos \alpha)^2 - (\cos \alpha)^4 + (\sin \alpha)^2 \\ &= (\cos \alpha)^2 + (\sin \alpha)^2 = 1 \end{aligned}$$



Ce qui donne $\sigma_{Fel} = \Gamma_\gamma \cdot \gamma \cdot h \cdot (\cos \alpha)^2 - \frac{dU}{dx} \cdot \tan \alpha \cdot (\cos \alpha)^2$

Soit

$$\sigma_{Fel} = \Gamma_\gamma \cdot \gamma \cdot h \cdot (\cos \alpha)^2 - \frac{dU}{dx} \cdot \sin \alpha \cdot \cos \alpha \quad (11)$$

L'introduction de l'hypothèse donnée en (9) ajoute une équation, ce qui rend le système isostatique, donc calculable.

Cependant, l'expérience a montré que le facteur de sécurité Γ_{Fel} calculé avec cette hypothèse complémentaire était 20 à 40 % plus optimiste que le calcul par d'autres méthodes, de type Bishop, par exemple.

c. Hypothèse de Faure

Il existe certains cas où la contrainte de Fellenius est assez éloignée de l'état réel des contraintes dans le sol. Faure a estimé la contrainte dans le sol à partir des cercles de Mohr, et en intégrant les efforts extérieurs appliqués sur la tranche. Après recherches, il est apparu que le choix optimal pour σ_0 et v était :

$$\sigma_0 = \frac{\left(\frac{\Delta W + F_v}{dx}\right) + c \cdot \cot \varphi}{1 + \sin \varphi \cdot \cos \left(2\alpha - \varphi - \frac{\pi}{2}\right)} \cdot \cos^2 \varphi - c \cdot \cot \varphi - \frac{(dU + F_h)}{dx}$$

$$v = \tan \alpha$$

L'expression de σ_0 provient du calcul trigonométrique dans le cercle de Mohr, en supposant que la contrainte n'est pas une contrainte principale.

La prise en compte d'une contrainte initiale de cette forme permet :

- d'affiner la contrainte calculée initialement, puisqu'elle représente l'état réel de contraintes dans le sol ;
- de mieux prendre en compte l'augmentation de la contrainte dans le sol dû aux efforts extérieurs verticaux (F_v) comme horizontaux (F_h) (surcharges, ancrages, ...).

3) Théorie de la méthode des perturbations

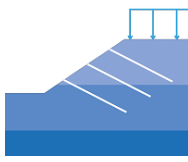
a. Introduction

L'objectif de la méthode des perturbations est « d'améliorer » la contrainte de Fellenius calculée en (11), en y ajoutant un facteur de perturbation, fonction de α :

$$\sigma_{pert} = \sigma_{Fel} \cdot (\lambda + \mu \cdot (\tan \alpha)^n) \quad (12)$$

Avec :

σ_{pert} : contrainte de perturbation



σ_{Fel} : contrainte de Fellenius, calculée en (11)

n : 1 ou 2

λ, μ : inconnus du système (paramètres sans dimension)

L'équation fondamentale de la stabilité (1), associée à la loi de Coulomb (2) donne une équation liant τ et σ au facteur de sécurité Γ , en éliminant τ_{max} :

$$\tau = \frac{\tau_{max}}{\Gamma \cdot \Gamma_{S3} \frac{c'}{\Gamma_c \cdot \Gamma \cdot \Gamma_{S3}} + \frac{\sigma \cdot \tan \varphi}{\Gamma_\varphi \cdot \Gamma \cdot \Gamma_{S3}}} \quad (13)$$

Avec σ donné en (12).

a. Mise à jour des équations avec les hypothèses données

En développant les équations (4a), (4b) et (5) avec les hypothèses de la méthode des perturbations, il vient :

- Pour l'équation (4a) :

$$-dU - dE' + \left(\frac{c'}{\Gamma_c \cdot \Gamma \cdot \Gamma_{S3}} + \frac{\sigma_{Fel} \cdot (\lambda + \mu \cdot (\tan \alpha)^n) \cdot \tan \varphi}{\Gamma_\varphi \cdot \Gamma \cdot \Gamma_{S3}} \right) \cdot dx - \sigma_{Fel} \cdot (\lambda + \mu \cdot (\tan \alpha)^n) \cdot dx \cdot \tan \alpha = 0 \quad (14a)$$

En intégrant (14a), il vient alors :

$$U_0 - U_1 + E'_0 - E'_1 + \int_{x_0}^{x_1} \left(\frac{c'}{\Gamma_c \cdot \Gamma \cdot \Gamma_{S3}} + \frac{\sigma_{Fel} \cdot (\lambda + \mu \cdot (\tan \alpha)^n) \cdot \tan \varphi}{\Gamma_\varphi \cdot \Gamma \cdot \Gamma_{S3}} \right) \cdot dx - \int_{x_0}^{x_1} \sigma_{Fel} \cdot ((\lambda + \mu \cdot (\tan \alpha)^n) \cdot \tan \alpha) \cdot dx = 0 \quad (14b)$$

Intégrer l'équation (4) (afin d'éliminer l'inconnue dE') n'était pas utile, puisqu'elle faisait intervenir une contrainte normale inconnue.

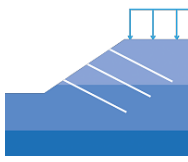
Les inconnues de l'équation (14b) sont : Γ, λ et μ

- Pour l'équation (4b) :

$$-dT - \Gamma_\gamma \cdot \gamma \cdot h \cdot dx + \left(\frac{c'}{\Gamma_c \cdot \Gamma \cdot \Gamma_{S3}} + \frac{\sigma_{Fel} \cdot (\lambda + \mu \cdot (\tan \alpha)^n) \cdot \tan \varphi}{\Gamma_\varphi \cdot \Gamma \cdot \Gamma_{S3}} \right) \cdot \tan \alpha \cdot dx + \sigma_{Fel} \cdot (\lambda + \mu \cdot (\tan \alpha)^n) \cdot dx = 0$$

En intégrant (15a) :

$$T_0 - T_1 - \int_{x_0}^{x_1} \Gamma_\gamma \cdot \gamma \cdot h \cdot dx - \int_{x_0}^{x_1} \left(\frac{c'}{\Gamma_c \cdot \Gamma \cdot \Gamma_{S3}} + \frac{\sigma_{Fel} \cdot (\lambda + \mu \cdot (\tan \alpha)^n) \cdot \tan \varphi}{\Gamma_\varphi \cdot \Gamma \cdot \Gamma_{S3}} \right) \cdot \tan \alpha \cdot dx + \int_{x_0}^{x_1} \sigma_{Fel} \cdot (\lambda + \mu \cdot (\tan \alpha)^n) \cdot dx = 0 \quad (15b)$$



Les inconnues de l'équation (15b) sont : Γ , λ et μ

- Pour l'équation (5) :

$$\int_{x_0}^{x_1} \left[y \cdot \left(\left(\frac{c'}{\Gamma_c \cdot \Gamma \cdot \Gamma_{S3}} + \frac{\sigma_{Fel} \cdot (\lambda + \mu \cdot (\tan \alpha)^n) \cdot \tan \varphi}{\Gamma_\varphi \cdot \Gamma \cdot \Gamma_{S3}} \right) - \sigma_{Fel} \cdot (\lambda + \mu \cdot (\tan \alpha)^n) \cdot \tan \alpha \right) + \right. \\ \left. x \cdot \left(\Gamma_\gamma \cdot \gamma \cdot h - \left(\frac{c'}{\Gamma_c \cdot \Gamma \cdot \Gamma_{S3}} + \frac{\sigma_{Fel} \cdot (\lambda + \mu \cdot (\tan \alpha)^n) \cdot \tan \varphi}{\Gamma_\varphi \cdot \Gamma \cdot \Gamma_{S3}} \right) \cdot \tan \alpha - \sigma_{Fel} \cdot (\lambda + \mu \cdot (\tan \alpha)^n) \right) \right] \cdot dx + \\ \int_{x_0}^{x_1} (-y \cdot dU - y \cdot dE' + x \cdot dT) + M_{add} = 0 \quad (16)$$

Les inconnues de l'équation (16) sont : Γ , λ et μ

Les 3 équations (14b), (15b) et (16) ont 3 inconnues : le système est isostatique et est donc calculable !

De plus, il est possible d'écrire les 3 équations linéairement par rapport à λ et μ :

b. Equations de la méthode des perturbations : système matriciel

- Equation des forces horizontales

(14b) devient alors :

$$\lambda \cdot \left[\int_{x_0}^{x_1} \sigma_{Fel} \cdot \left(\frac{\tan \varphi}{\Gamma_\varphi \cdot \Gamma \cdot \Gamma_{S3}} - \tan \alpha \right) \cdot dx \right] + \mu \cdot \left[\int_{x_0}^{x_1} \sigma_{Fel} \cdot (\tan \alpha)^n \cdot \left(\frac{\tan \varphi}{\Gamma_\varphi \cdot \Gamma \cdot \Gamma_{S3}} - \tan \alpha \right) \cdot dx \right] + \\ U_0 - U_1 + E'_0 - E'_1 + \int_{x_0}^{x_1} \frac{c'}{\Gamma_c \cdot \Gamma \cdot \Gamma_{S3}} \cdot dx = 0 \quad (17)$$

(17) est de la forme :

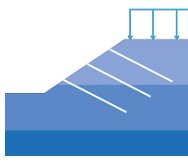
$$\lambda \cdot A + \mu \cdot B + C = 0$$

Avec :

$$A = \int_{x_0}^{x_1} \sigma_{Fel} \cdot \frac{\tan \varphi}{\Gamma_\varphi \cdot \Gamma \cdot \Gamma_{S3}} \cdot dx - \int_{x_0}^{x_1} \sigma_{Fel} \cdot \tan \alpha \cdot dx \quad (18b)$$

$$B = \int_{x_0}^{x_1} \sigma_{Fel} \cdot (\tan \alpha)^n \cdot \frac{\tan \varphi}{\Gamma_\varphi \cdot \Gamma \cdot \Gamma_{S3}} \cdot dx - \int_{x_0}^{x_1} \sigma_{Fel} \cdot (\tan \alpha)^{n+1} \cdot dx \quad (18c)$$

$$C = \int_{x_0}^{x_1} \frac{c'}{\Gamma_c \cdot \Gamma \cdot \Gamma_{S3}} \cdot dx + U_0 - U_1 + E'_0 - E'_1 \quad (18d)$$



Chacun des termes A, B et C contiennent un terme en $\frac{1}{\Gamma}$ et un terme connu.

(18b) devient :

$$A = H_1 + \frac{H_2}{\Gamma} \quad (18e)$$

Avec :

$$H_1 = - \int_{x_0}^{x_1} \sigma_{Fel} \cdot \tan \alpha \cdot dx \quad (18f)$$

$$H_2 = \int_{x_0}^{x_1} \sigma_{Fel} \cdot \frac{\tan \varphi}{\Gamma_\varphi \cdot \Gamma_{S3}} \cdot dx \quad (18g)$$

H_1 et H_2 sont alors entièrement calculables.

De la même manière, (18c) devient :

$$B = H_3 + \frac{H_4}{\Gamma} \quad (18h)$$

Avec :

$$H_3 = - \int_{x_0}^{x_1} \sigma_{Fel} \cdot (\tan \alpha)^{n+1} \cdot dx \quad (18i)$$

$$H_4 = \int_{x_0}^{x_1} \sigma_{Fel} \cdot (\tan \alpha)^n \cdot \frac{\tan \varphi}{\Gamma_\varphi \cdot \Gamma_{S3}} \cdot dx \quad (18j)$$

Et (18d) est de la forme :

$$C = H_5 + \frac{H_6}{\Gamma} \quad (18k)$$

Avec :

$$H_5 = U_0 - U_1 + E'_0 - E'_1 \quad (18l)$$

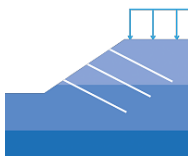
$$H_6 = \int_{x_0}^{x_1} \frac{c'}{\Gamma_c \cdot \Gamma_{S3}} \cdot dx \quad (18m)$$

- Equation des forces verticales

λ et μ sont isolés dans (15b) :

$$\begin{aligned} \lambda \cdot \left[\int_{x_0}^{x_1} \sigma_{Fel} \cdot \left(1 + \frac{\tan \varphi \cdot \tan \alpha}{\Gamma_\varphi \cdot \Gamma \cdot \Gamma_{S3}} \right) \cdot dx \right] + \mu \cdot \left[\int_{x_0}^{x_1} \sigma_{Fel} \cdot (\tan \alpha)^n \cdot \left(1 + \frac{\tan \varphi \cdot \tan \alpha}{\Gamma_\varphi \cdot \Gamma \cdot \Gamma_{S3}} \right) \cdot dx \right] \\ + \int_{x_0}^{x_1} \frac{c' \cdot \tan \alpha}{\Gamma_c \cdot \Gamma \cdot \Gamma_{S3}} \cdot dx - \int_{x_0}^{x_1} \Gamma_\gamma \cdot \gamma \cdot h \cdot dx + T_0 - T_1 = 0 \end{aligned} \quad (19)$$

(19) est de la forme :



$$\lambda \cdot D + \mu \cdot E + F = 0 \quad (20a)$$

Avec :

$$D = \int_{x_0}^{x_1} \sigma_{Fel} \cdot dx + \int_{x_0}^{x_1} \sigma_{Fel} \cdot \left(\frac{\tan \varphi \cdot \tan \alpha}{\Gamma_\varphi \cdot \Gamma \cdot \Gamma_{S3}} \right) \cdot dx \quad (20b)$$

$$E = \int_{x_0}^{x_1} \sigma_{Fel} \cdot (\tan \alpha)^n \cdot dx + \int_{x_0}^{x_1} \sigma_{Fel} \cdot (\tan \alpha)^{n+1} \cdot \left(\frac{\tan \varphi}{\Gamma_\varphi \cdot \Gamma \cdot \Gamma_{S3}} \right) \cdot dx \quad (20c)$$

$$F = \int_{x_0}^{x_1} \frac{c' \cdot \tan \alpha}{\Gamma_c \cdot \Gamma \cdot \Gamma_{S3}} \cdot dx + T_0 - T_1 - \int_{x_0}^{x_1} \Gamma_\gamma \cdot \gamma \cdot h \cdot dx \quad (20d)$$

$$D = V_1 + \frac{V_2}{\Gamma} \quad (20e)$$

Avec :

$$V_1 = \int_{x_0}^{x_1} \sigma_{Fel} \cdot dx \quad (20f)$$

$$V_2 = \int_{x_0}^{x_1} \sigma_{Fel} \cdot \frac{\tan \varphi \cdot \tan \alpha}{\Gamma_\varphi \cdot \Gamma_{S3}} \cdot dx \quad (20g)$$

$$E = V_3 + \frac{V_4}{\Gamma} \quad (20h)$$

Avec :

$$V_3 = \int_{x_0}^{x_1} \sigma_{Fel} \cdot (\tan \alpha)^n \cdot dx \quad (20i)$$

$$V_4 = \int_{x_0}^{x_1} \sigma_{Fel} \cdot (\tan \alpha)^{n+1} \cdot \frac{\tan \varphi}{\Gamma_\varphi \cdot \Gamma_{S3}} \cdot dx \quad (20j)$$

$$F = V_5 + \frac{V_6}{\Gamma} \quad (20k)$$

Avec :

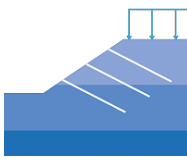
$$V_5 = T_0 - T_1 - \int_{x_0}^{x_1} \Gamma_\gamma \cdot \gamma \cdot h \cdot dx \quad (20l)$$

$$V_6 = \int_{x_0}^{x_1} \frac{c' \cdot \tan \alpha}{\Gamma_c \cdot \Gamma_{S3}} \cdot dx \quad (20m)$$

- Equation des moments

λ et μ sont isolés dans (16) :

$$\begin{aligned} & \lambda \cdot \left[\int_{x_0}^{x_1} \sigma_{Fel} \cdot \left[y \cdot \left(\frac{\tan \varphi}{\Gamma_\varphi \cdot \Gamma \cdot \Gamma_{S3}} - \tan \alpha \right) - x \cdot \left(\frac{\tan \varphi \cdot \tan \alpha}{\Gamma_\varphi \cdot \Gamma \cdot \Gamma_{S3}} + 1 \right) \right] \cdot dx \right] \\ & + \mu \cdot \left[\int_{x_0}^{x_1} \sigma_{Fel} \cdot \left[y \cdot \left(\frac{\tan \varphi \cdot (\tan \alpha)^n}{\Gamma_\varphi \cdot \Gamma \cdot \Gamma_{S3}} - (\tan \alpha)^{n+1} \right) - x \cdot \left(\frac{\tan \varphi \cdot (\tan \alpha)^{n+1}}{\Gamma_\varphi \cdot \Gamma \cdot \Gamma_{S3}} + (\tan \alpha)^n \right) \right] \cdot dx \right] \\ & + \int_{x_0}^{x_1} y \cdot \frac{c'}{\Gamma_c \cdot \Gamma \cdot \Gamma_{S3}} \cdot dx - \int_{x_0}^{x_1} x \cdot \frac{c'}{\Gamma_c \cdot \Gamma \cdot \Gamma_{S3}} \cdot \tan \alpha \cdot dx + \int_{x_0}^{x_1} x \cdot \Gamma_\gamma \cdot \gamma \cdot h \cdot dx \\ & + \int_{x_0}^{x_1} -y \cdot dU - y \cdot dE' + x \cdot dT + M_{add} = 0 \end{aligned} \quad (21)$$



(21) est de la forme :

$$\lambda \cdot G + \mu \cdot H + I = 0 \quad (22a)$$

Avec :

$$G = \int_{x_0}^{x_1} -\sigma_{Fel} \cdot (y \cdot \tan \alpha + x) \cdot dx + \int_{x_0}^{x_1} \sigma_{Fel} \cdot \frac{\tan \varphi}{\Gamma_\varphi \cdot \Gamma \cdot \Gamma_{S3}} \cdot (y - x \cdot \tan \alpha) \cdot dx \quad (22b)$$

$$H = \int_{x_0}^{x_1} -\sigma_{Fel} \cdot (\tan \alpha)^n \cdot (y \cdot \tan \alpha + x) \cdot dx + \int_{x_0}^{x_1} \sigma_{Fel} \cdot \frac{\tan \varphi \cdot (\tan \alpha)^n}{\Gamma_\varphi \cdot \Gamma \cdot \Gamma_{S3}} \cdot (y - x \cdot \tan \alpha) \cdot dx \quad (22c)$$

$$I = \int_{x_0}^{x_1} y \cdot \frac{c'}{\Gamma_c \cdot \Gamma \cdot \Gamma_{S3}} \cdot dx - \int_{x_0}^{x_1} x \cdot \frac{c'}{\Gamma_c \cdot \Gamma \cdot \Gamma_{S3}} \cdot \tan \alpha \cdot dx + \int_{x_0}^{x_1} x \cdot \Gamma_\gamma \cdot \gamma \cdot h \cdot dx + \int_{x_0}^{x_1} -y \cdot dU - y \cdot dE' + x \cdot dT + M_{add} \quad (22d)$$

$$G = O_1 + \frac{O_2}{\Gamma} \quad (22e)$$

Avec :

$$O_1 = \int_{x_0}^{x_1} -\sigma_{Fel} \cdot (y \cdot \tan \alpha + x) \cdot dx \quad (20f)$$

$$O_2 = \int_{x_0}^{x_1} \sigma_{Fel} \cdot \frac{\tan \varphi}{\Gamma_\varphi \cdot \Gamma_{S3}} \cdot (y - x \cdot \tan \alpha) \cdot dx \quad (22g)$$

$$H = O_3 + \frac{O_4}{\Gamma} \quad (22h)$$

Avec :

$$O_3 = \int_{x_0}^{x_1} -\sigma_{Fel} \cdot (\tan \alpha)^n \cdot (y \cdot \tan \alpha + x) \cdot dx \quad (22i)$$

$$O_4 = \int_{x_0}^{x_1} \sigma_{Fel} \cdot \frac{\tan \varphi}{\Gamma_\varphi \cdot \Gamma_{S3}} \cdot (y - x \cdot \tan \alpha) \cdot dx \quad (22j)$$

$$I = O_5 + \frac{O_6}{\Gamma} \quad (22k)$$

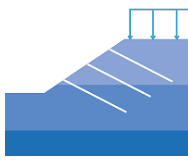
Avec :

$$O_5 = \int_{x_0}^{x_1} x \cdot \Gamma_\gamma \cdot \gamma \cdot h \cdot dx + \int_{x_0}^{x_1} -y \cdot dU - y \cdot dE' + x \cdot dT + M_{add} \quad (22l)$$

$$O_6 = \int_{x_0}^{x_1} \frac{c'}{\Gamma_c \cdot \Gamma_{S3}} \cdot (y - x \cdot \tan \alpha) \cdot dx \quad (22m)$$

Etant donnée la présence du terme $\tan \alpha$ dans les équations, il faut poser une limitation dans le cas où $\alpha \rightarrow \pm(\pi/2)$. On va considérer que si $|\alpha| = (\pi/2) \pm 10^{-5}$ rad, alors $\sigma_{pert} = 0$ dans (12).

- Ecriture matricielle



Les équations (14b), (15b) et (16), du fait de la linéarité du système sur λ et μ , peuvent s'écrire sous la forme d'une équation matricielle. On a :

$$\begin{pmatrix} A & B & C \\ D & E & F \\ G & H & I \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \lambda \\ \mu \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (23a)$$

Avec les variables A, B, C, D, E, F, G, H et I définies dans les équations (18e) à (22k), soit :

$$\begin{pmatrix} H_1 + \frac{H_2}{F} & H_3 + \frac{H_4}{F} & H_5 + \frac{H_6}{F} \\ V_1 + \frac{V_2}{F} & V_3 + \frac{V_4}{F} & V_5 + \frac{V_6}{F} \\ O_1 + \frac{O_2}{F} & O_3 + \frac{O_4}{F} & O_5 + \frac{O_6}{F} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \lambda \\ \mu \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (23b)$$

Avec $H_1, \dots, O_6$ directement calculables. Ce système, de la forme $A \cdot x = 0$, est un système d'équations linéaires homogènes.

c. Résolution du système d'équations

- Ecriture de l'équation du facteur de sécurité

La solution triviale du système (23b) est : $\lambda = \mu = 0$, ce qui ramène à la solution de Fellenius. Les solutions sont dites non triviales si le déterminant de A est nul, soit :

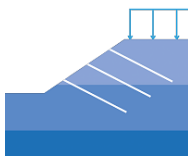
$$\det \begin{pmatrix} H_1 + \frac{H_2}{F} & H_3 + \frac{H_4}{F} & H_5 + \frac{H_6}{F} \\ V_1 + \frac{V_2}{F} & V_3 + \frac{V_4}{F} & V_5 + \frac{V_6}{F} \\ O_1 + \frac{O_2}{F} & O_3 + \frac{O_4}{F} & O_5 + \frac{O_6}{F} \end{pmatrix} = 0 \quad (24)$$

Par un changement de variable de la forme $\Gamma' = \frac{1}{\Gamma}$, et en développant le calcul du déterminant, il vient une équation de la forme :

$$a_0 \cdot \Gamma'^3 + a_1 \cdot \Gamma'^2 + a_2 \cdot \Gamma' + a_3 = 0 \quad (25)$$

Avec :

$$\begin{aligned} a_0 &= V_6 \cdot (-H_2 \cdot O_4 + H_4 \cdot O_2) + V_4 \cdot (H_2 \cdot O_6 - H_6 \cdot O_2) + V_2 \\ &\quad \cdot (-H_4 \cdot O_6 + H_6 \cdot O_4) \\ a_1 &= V_6 \cdot (-H_1 \cdot O_4 - H_2 \cdot O_3 + H_3 \cdot O_2 + H_4 \cdot O_1) + V_5 \\ &\quad \cdot (-H_2 \cdot O_4 + H_4 \cdot O_2) + \end{aligned} \quad (25a)$$



$$\begin{aligned}
 & V_4 \cdot (H_1 \cdot O_6 + H_2 \cdot O_5 - H_5 \cdot O_2 - H_6 \cdot O_1) + V_3 \\
 & \quad \cdot (H_2 \cdot O_6 - H_6 \cdot O_2) + \\
 & V_2 \cdot (-H_3 \cdot O_6 - H_4 \cdot O_5 + H_5 \cdot O_4 + H_6 \cdot O_3) + V_1 \\
 & \quad \cdot (H_6 \cdot O_4 - H_4 \cdot O_6)
 \end{aligned} \tag{25b}$$

$$\begin{aligned}
 a_2 = & V_6 \cdot (-H_1 \cdot O_3 + H_3 \cdot O_1) + V_5 \\
 & \quad \cdot (-H_1 \cdot O_4 - H_2 \cdot O_3 + H_3 \cdot O_2 + H_4 \cdot O_1) + \\
 & V_4 \cdot (H_1 \cdot O_5 - H_5 \cdot O_1) + V_3 \\
 & \quad \cdot (H_1 \cdot O_6 + H_2 \cdot O_5 - H_6 \cdot O_1 - H_5 \cdot O_2) + \\
 & V_2 \cdot (-H_3 \cdot O_5 + H_5 \cdot O_3) + V_1 \\
 & \quad \cdot (-H_3 \cdot O_6 - H_4 \cdot O_5 + H_5 \cdot O_4 + H_6 \cdot O_3)
 \end{aligned} \tag{25c}$$

$$\begin{aligned}
 a_3 = & V_5 \cdot (-H_1 \cdot O_3 + H_3 \cdot O_1) + V_3 \cdot (H_1 \cdot O_5 - H_5 \cdot O_1) + V_1 \\
 & \quad \cdot (-H_3 \cdot O_5 + H_5 \cdot O_3)
 \end{aligned} \tag{25d}$$

La méthode de Cardan est alors utilisée pour déterminer les racines de l'équation (25).

- Résolution de l'équation du troisième degré en Γ'

L'équation de base est l'équation (25) : $a_0 \cdot \Gamma'^3 + a_1 \cdot \Gamma'^2 + a_2 \cdot \Gamma' + a_3 = 0$

Si $a_0 \neq 0$, alors l'équation (25) peut être divisée par a_0 , et le changement de variable $X = \Gamma' + \frac{a_1}{3 \cdot a_0}$ peut être effectué. On obtient une équation de la forme :

$$X^3 + p \cdot X + q = 0 \tag{26}$$

Avec :

$$p = \frac{a_3}{a_0} - \frac{a_1^2}{3 \cdot a_0^2} \tag{26a}$$

$$q = \frac{2 \cdot a_1^3}{27 \cdot a_0^3} - \frac{a_1 \cdot a_2}{3 \cdot a_0^2} + \frac{a_3}{a_0} \tag{26b}$$

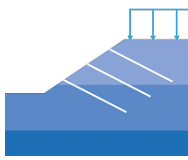
La méthode de Cardan consiste à calculer le discriminant Δ de (26) et à étudier son signe :

$$\Delta = \frac{q^2}{4} + \frac{p^3}{27} \tag{26c}$$

- si $\Delta > 0$, alors il existe une solution réelle X calculée par la formule :

$$X = \left(-\frac{q}{2} + \left(\frac{q^2}{4} + \frac{p^3}{27} \right)^{\frac{1}{2}} \right)^{\frac{1}{3}} + \left(-\frac{q}{2} - \left(\frac{q^2}{4} + \frac{p^3}{27} \right)^{\frac{1}{2}} \right)^{\frac{1}{3}} \tag{27}$$

- si $\Delta = 0$, alors il existe deux solutions réelles X_1 et X_2 calculées par les formules :



$$X_1 = \frac{3 \cdot q}{p} \quad (28a)$$

$$X_2 = \frac{-3 \cdot q}{2 \cdot p} \quad (28)$$

- Si $\Delta < 0$, alors il existe 3 solutions réelles X_i , avec i variant de 0 à 2 :

$$X_i = 2 \cdot \sqrt{\frac{-p}{3}} \cdot \cos\left(\frac{1}{3} \cdot \arccos\left(\frac{-q}{2} \cdot \sqrt{\frac{27}{-p^3}}\right) + \frac{2 \cdot i \cdot \pi}{3}\right) \quad (29)$$

Il faut alors refaire le changement de variable $\Gamma' = X - \frac{a_1}{3 \cdot a_0}$ et $\Gamma = \frac{1}{\Gamma'}$, afin de déterminer la valeur de Γ_{pert} la plus petite, qui sera la valeur du facteur de sécurité retenue pour la méthode des perturbations. Dans le cas où $a_0 = 0$, l'équation à résoudre est du second degré, mais le raisonnement sur Γ' reste identique. Si l'équation est du premier degré, alors la solution est triviale.