

Réflexions et propositions pour le calcul optimisé des parois clouées

M. FAVRE
E. VERMOOTE
D. FUENTES

GEOS Ingénieurs Conseils
72, rue Georges de Mestral
Bât. Athena 1
Archamps Technopole
74160 Archamps

Résumé

Cet article a pour objets : (1) de présenter les problèmes auxquels sont confrontés les praticiens lors du dimensionnement des parois clouées en particulier pour l'optimisation du quantitatif d'inclusions et de la détermination des efforts apportés au parement ; (2) à partir de développements ou extensions de méthodes existantes, de proposer des méthodes permettant d'optimiser les longueurs et sections des inclusions et de déterminer les efforts ponctuels apportés au parement par les inclusions afin de pouvoir réaliser le dimensionnement structurel de ce dernier ; (3) de présenter les développements opérationnels résultant de ces développements.

La méthode proposée est basée, entre autres, sur des développements de propositions contenues dans l'additif aux Recommandations CLOUTERRE publié en 2002 et dans la norme NF 94 270 publiée en 2009. Une réflexion a été menée sur le mécanisme de transfert de l'effort mobilisé à l'intersection entre l'inclusion et la surface de rupture jusqu'au parement pour déterminer les efforts ponctuels appliqués par les têtes d'inclusions à ce dernier.

Mots-clés : parois clouées, inclusions, parement, méthode de Culmann, poussée active et au repos.

Proposals for the design optimization of nailed walls

Abstract

The goals of this document are (1) to present the problems encountered by practitioners when making the design of soil nail walls, particularly to optimize the quantity of nail bars and to determine the efforts applied to the shotcrete wall facing, (2) to propose methods giving answers to the above mentioned problems by development of existing methods and (3) to present the practical solutions. The method is based on developments of the proposals included in the French document « Addendum to the CLOUTERRE Recommendations » published in 2002 and in the French standard NF 94 270 Geotechnical design-Retaining structures-Reinforced and soil nailing structures published in 2009. The point loads due to nail heads applied to the shotcrete face are determined from the efforts in the nail bars taking into account the mechanism of transfer.

Key words: nailed walls, nail bars, shotcrete wall facing, Culmann's method, active and at rest pressure.

Préambule

Le dimensionnement des ouvrages de soutènement du type paroi clouée en appliquant l'EUROCODE 7 pose aux praticiens un certain nombre de problèmes :

- 1) pour les vérifications dites GEO :
 - le calcul des longueurs de clous strictement nécessaires pour satisfaire les critères de stabilité ;
- 2) pour les vérifications dites STR :
 - le calcul des sections d'acier strictement nécessaires dans les inclusions,
 - le calcul des efforts ponctuels appliqués au parement par les têtes d'inclusions et/ou de la répartition de la pression de contact sol-parement.

Le calcul des longueurs de clous strictement nécessaires implique que le concepteur suppose un maillage initial de clous (espacements vertical et horizontal) et la longueur de ces derniers. Sur cette base sont réalisés des calculs de vérification qui conduisent à allonger ou raccourcir les lits de clous suivant que les facteurs de sécurité calculés sont respectivement insuffisants ou surabondants. Cette démarche où le diamètre de forage et le frottement latéral unitaire caractérisant l'interaction limite sol-clou sont fixés, requiert que le concepteur procède par tâtonnements. Par ailleurs, cette démarche ne garantit pas que la quantité de clous soit minimisée.

Les algorithmes de calcul utilisés jusqu'à ce jour calculent la résistance mobilisable à l'arrière de la surface de rupture (minimum de la résistance structurale et de la résistance à l'arrachement) puis intègrent cet effort dans les équations d'équilibre pour calculer le facteur de sécurité mais ces algorithmes ne fournissent pas l'effort strictement nécessaire dans chaque inclusion pour atteindre le facteur de sécurité visé : le dimensionnement de la section des inclusions doit donc être réalisé lui aussi par tâtonnements.

Enfin, les algorithmes et méthodes de calculs actuels ne fournissent pas les efforts ponctuels appliqués au parement.

Le but de cet article est de proposer une méthode de calcul permettant de répondre à ces problèmes et de présenter l'implémentation qui en a été faite dans un logiciel.

Analyse des documents de références

Les référentiels applicables au dimensionnement des parois clouées ont évolué :

- Recommandations CLOUTERRE 1991 ;
- Additif 2002 aux Recommandations CLOUTERRE ;
- Normes NFP 94-270 sur les ouvrages en sol renforcé 2009.

Ce dernier document s'avère être, à l'usage, difficilement applicable pour le praticien, puisqu'il propose dans son annexe E3 :

- soit une méthode simplifiée applicable seulement pour des cas « simplistes » ;
- soit par une modélisation numérique sans que cette dernière soit détaillée.

Compte tenu des conditions particulièrement restrictives pour que puisse être appliquée la méthode « simplifiée », les cas de la pratique courante relèveraient tous de la modélisation numérique qui reste peu explicite, ce qui conduit, par la suite, à réflexions et propositions.

La modélisation simplifiée recommandée consiste à déterminer la valeur de l'effort de traction maximal dans chaque lit de renforcement :

- à partir de la valeur de la résultante $P_{0,d}$ de la poussée au repos s'exerçant, avant le début de l'excavation, sur un écran vertical positionné au voisinage du parement et de même hauteur que celui-ci ;
- en distribuant cet effort $P_{0,d}$ dans les lits de clous pour tenir compte des conséquences des phases de construction qui conduisent à une augmentation des efforts en tête et à une réduction en pied.

Dans la pratique, la distribution conduisant à une résultante d'intensité $P_{0,d}$ est obtenue en ajoutant une pression uniforme $\sigma_{0,d}$ à la pression $\sigma_{ah,d}$ qui représente la composante horizontale de la poussée active selon Rankine.

Avec :

- $P_{0,d}$: valeur de calcul de la poussée des terres au repos ;
- $\sigma_{0,d}$: valeur de calcul de la contrainte horizontale uniforme à ajouter à $\sigma_{ah,d}$

$$\sigma_{0,d} = \frac{1}{2}(K_0 - K_a)\gamma h$$

Il faut que les indices et notations soient les mêmes sur les deux lignes.

- $\sigma_{ah,d}$: valeur de calcul de la composante horizontale de la poussée active selon Rankine.

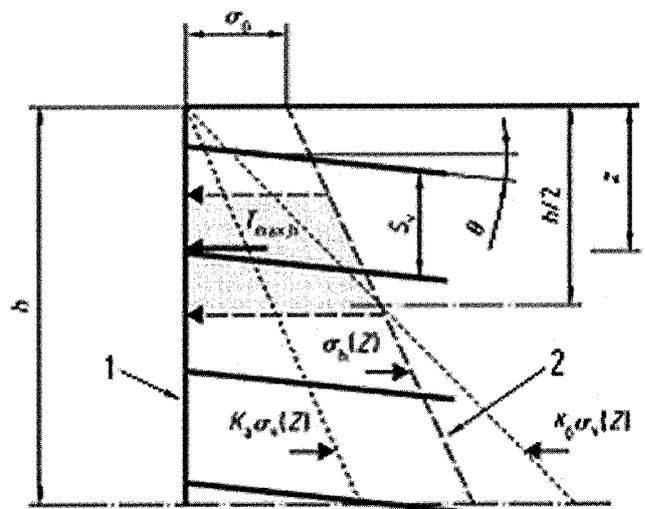


FIG. 1 Distribution des efforts à considérer dans les lits de clous pour vérifier la stabilité interne d'un massif cloué dans le cas d'une modélisation simplifiée.

1. Écran vertical positionné au voisinage du parement.

2. Distribution des contraintes horizontales à considérer.

Diagram of pressure to be taken into account to check the internal stability of a nailed wall.

Dans ces conditions, il est apparu intéressant que soit développée et proposée une méthode pour les cas qui relèvent de la pratique courante.

3

Problématique des calculs

3.1

Calcul des efforts appliqués au parement

Dans la pratique courante, la problématique du calcul des efforts appliqués au parement et de son dimensionnement reste entière.

3.1.1

Généralités

En accord avec l'additif 2002 aux recommandations CLOUTERRE 1991, l'effort ponctuel retenu en tête de clou pour dimensionner le parement est

$$T_N = \text{Max} [T_0 ; T_1 ; T_2] \cos (\theta - \eta) \quad (1)$$

Avec :

θ = angle de l'axe du clou sous l'horizontale ;

η = angle d'inclinaison du parement par rapport à la verticale ;

T_0 calculé à partir de T_{MAX} permettant de justifier la stabilité d'ensemble ;

T_1 calculé afin d'assurer la stabilité du parement par frottement ;

T_2 calculé pour assurer le confinement ;

T_{MAX} borne supérieure ou enveloppe des tractions dans les clous permettant de justifier la stabilité d'ensemble dans tous les cas de figure des calculs.

3.1.2

Calcul de T_{MAX}

Le principe de calcul est le suivant.

Pour chaque surface de rupture S_i envisagée :

– faire un calcul du facteur de sécurité, FS_{oi} , sans inclusions ;

– faire un calcul du facteur de sécurité, FS_{ri} , avec inclusions dont les longueurs sont saisies initialement par l'utilisateur mais sans en limiter la résistance structurale.

Connaissant l'effort stabilisant, T_{io} , apporté par les inclusions sur la surface de rupture S_i et sachant que cet effort stabilisant, A_v , fait passer le facteur de sécurité FS_{oi} à FS_{ri} ($\geq FS_{oi}$), il est recherché par itérations la valeur de l'effort T_i strictement nécessaire pour que $FS_{ri} \geq FS_{oi}$.

Avec :

FS_{oi} : facteur de sécurité de la surface de rupture sans inclusion(s) ;

FS_{ri} : facteur de sécurité de la surface de rupture avec inclusion(s).

$$\text{Avec l'effort } T_{io}, FS_{ri} = FS_{oi} + \Delta FS_{Tio} \quad (2)$$

Le problème consiste :

$$\text{– à rechercher } T_i \text{ tel que } \Delta FS_{T_i} = FS_{visé} - FS_{oi} \quad (3)$$

– à itérer les calculs ci-dessus pour toutes les surfaces de rupture et pour toutes les phases afin d'obtenir $T_{MAX} = \text{Max} [T_i]$.

Cette méthode peut être appliquée en considérant que les inclusions travaillent soit de manière axiale, soit selon l'approche multicritère telle que proposée par Blondeau *et al.*

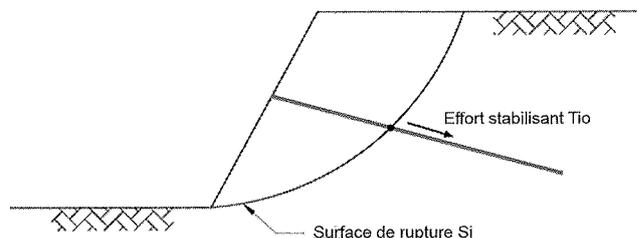


FIG. 2 Position du problème du calcul itératif de l'effort T_i dans une inclusion pour assurer la stabilisation interne suivant la surface de rupture S_i .

Definition of the problem of the iterative calculation of the force, T_i , in the nail bar to ensure the internal stabilization along the failure surface S_i .

3.1.3

Détermination de T_0 à partir de T_{MAX}

L'optimisation proposée suppose que la longueur des clous est toujours conditionnée par T_{MAX} .

Il est proposé que T_o , effort amené au parement pour assurer la stabilité globale, soit déduit de T_{MAX} , en retranchant de ce dernier, le frottement mobilisé entre la surface de rupture et le parement.

A l'extrême, si le clou est gainé et peut donc coulisser librement dans la zone entre la surface de rupture et le parement, ce qui correspondrait à ce qui se passe sur la longueur libre d'un tirant actif, alors $T_o = T_{MAX}$.

A l'inverse, si l'effort de frottement mobilisable est supérieur à T_{MAX} dans cette zone du fait d'un frottement latéral unitaire limite et/ou d'une longueur passive du clou élevés, l'effort T_{MAX} est complètement transmis au sol avant même d'atteindre le parement et $T_o = 0$.

La représentation du mécanisme est celle présentée sur le schéma ci-après.

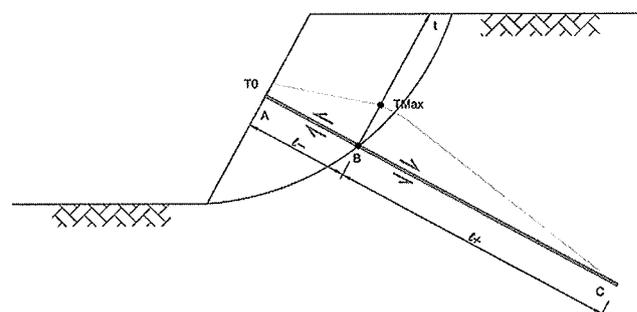


FIG. 3 Variation des efforts le long de l'inclusion. Variation of the forces along the nails.

$$\text{où } T_{MAX} = \text{Min} \left[\frac{T_{barré}}{\Gamma_{acier}} ; \pi \phi_f l + \frac{q_{s_{bc}}}{\Gamma_{qs}} \right] \quad (4)$$

$$\text{et } T_o = T_{MAX} - \pi \phi_f l - \frac{q_{s_{ab}}}{\Gamma_{qs}} \quad (5)$$

3.1.4

Calcul de T_1

T_1 est l'effort nécessaire pour mobiliser un frottement suffisant à l'arrière du parement afin d'éviter les mouvements tangentiels.

La figure 4 précise les données du problème.

$$F_{\text{moteur}} = W_T = W \sin \alpha$$

$$F_{\text{Résistant}} = (W_N + T_1) \text{tg} \Phi_i + C_i l$$

$$F_{\text{Résistant}} = (W \cos \alpha + T_1) \text{tg} \Phi_i + C_i l$$

$$FS_G = \frac{F_{\text{Res}}}{F_{\text{Mot}}} = \frac{W \cos \alpha \text{tg} \Phi_i + T_1 \text{tg} \Phi_i + C_i l}{W \sin \alpha}$$

$$T_1 = (FS_G W \sin \alpha - W \cos \alpha \text{tg} \Phi_i - C_i l) \times \frac{1}{\text{tg} \Phi_i}$$

$$T_1 = W \left(FS_G \frac{\sin \alpha}{\text{tg} \Phi_i} - \cos \alpha \right) - \frac{C_i l}{\text{tg} \Phi_i}$$

Avec :

$W = 25 \text{ (kN/m}^3) \times e \text{ (m)} \times l \text{ (m)}$;

Φ_i = angle de frottement à l'interface sol parement ;

C_i = cohésion à l'interface sol parement.

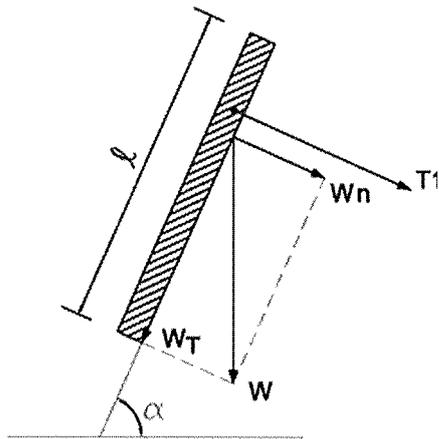


FIG. 4 Modélisation des efforts de glissement de la paroi.
Modelling of the sliding forces of the wall.

L'effort T_1 est distribué entre les clous au prorata des surfaces reprises par chacun d'eux.

3.1.5

Calcul de T_2

3.1.5.1

Généralités

La méthode pour estimer T_2 est une extension de la méthode simplifiée proposée dans l'annexe E3 de la

norme NF 94 270 et consiste, dans un premier temps, à calculer la poussée active à l'arrière du parement considéré comme un écran fictif par la méthode de Culmann.

T_2 est l'effort de confinement apporté par les clous qui garantit la stabilité vis-à-vis des efforts de poussée active sur le parement.

3.1.5.2

Méthodologie générale d'obtention du diagramme des pressions et des résultantes des poussées

Le calcul de chacun des diagrammes de pressions (sol, eau et surcharges) est réalisé suivant le même principe :

- l'écran sur lequel s'exercent les poussées est discrétisé suivant un pas choisi par l'utilisateur ;
- les incréments de poussée s'exerçant sur l'écran sur chaque segment de discrétisation sont calculés par la méthode de Culmann ;
- la répartition des résultantes des poussées sur l'écran permet de calculer le diagramme des poussées, traduites en pression sur l'écran, par dérivation du diagramme des forces ;
- la résultante de la poussée totale est ensuite calculée par sommation des incréments de poussée.

La méthode de Culmann est utilisée pour la détermination des poussées et permet de tenir compte d'une forme quelconque de terre-plein à l'amont du mur et d'une surcharge elle aussi quelconque.

Le point d'application de la poussée est donné par le barycentre du diagramme de pressions déterminé ci-dessus.

C'est une généralisation de la théorie de Coulomb, puisque basée sur des lignes de rupture rectilignes.

Comme le recommande G.B. Tschebotariouff, le frottement sol-écran peut être négligé ($\alpha = 0$) dans le calcul de la poussée qui sera alors légèrement surestimée de 5 à 10 %.

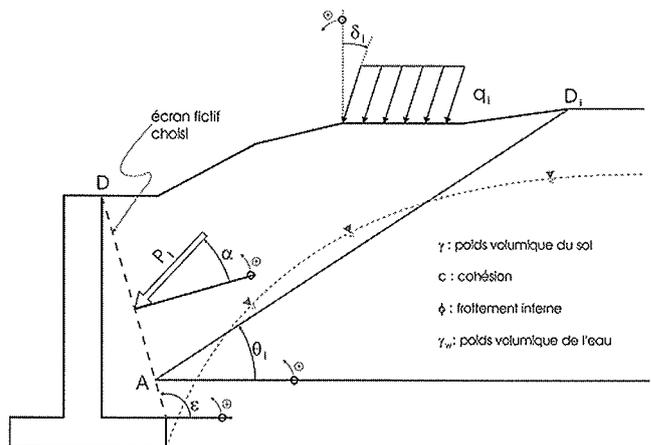


FIG. 5 Détermination de la résultante des poussées.
Calculation of the active earth pressure.

Les forces s'exerçant sur le prisme de terre ADD_i sont les suivantes :

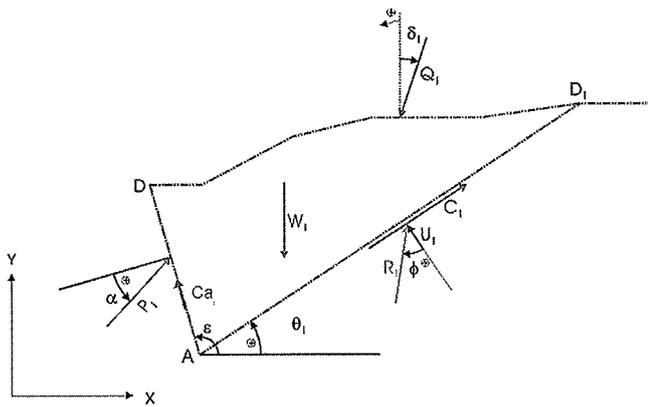


FIG. 6 Forces s'exerçant sur le prisme de terre.
Forces acting on the earth block.

- W_i : poids des terres du prisme ADD_i ;
- W_i : aire $(ADD_i) \times \gamma$;
- Q_i : résultante des surcharges sur le prisme ADD_i . $Q_i = \int q_i$;
- U_i : résultante des pressions interstitielles sur le plan AD_i ;
- C_i : cohésion sur le plan AD_i $C_i = C \times l(AD_i) = C \times l_i$;
- Ca_i : adhérence sur l'écran fictif $Ca_i = Ca \times l(AD)$;
- R_i : réaction du plan AD_i ;
- P_i : résultante des poussées s'exerçant sur le plan AD en considérant le plan de rupture AD_i ;
- α : inclinaison de la poussée active sur l'écran fixée par le concepteur.

Polygone des forces pour la surface de rupture AD

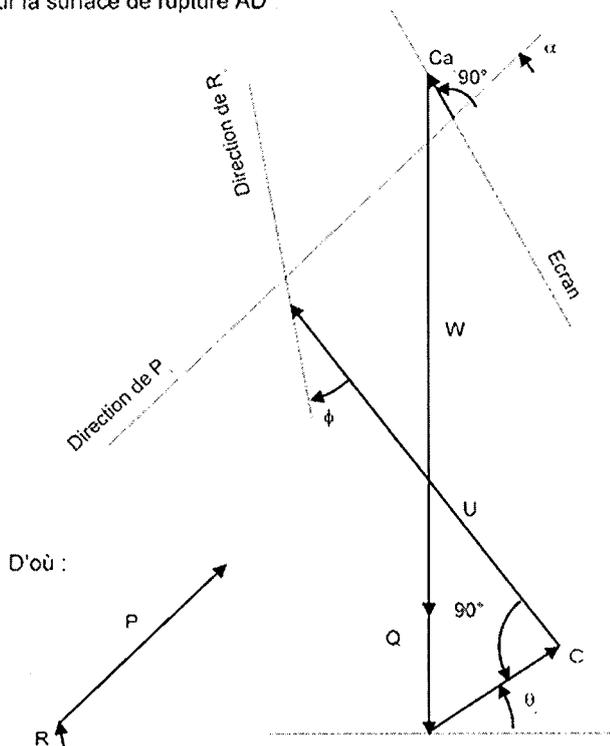


FIG. 7 Polygone des forces.
Polygon of forces.

La conduite de ce calcul pour les plans AD_1 à $AD_{n'}$ inclinés de θ_1 à $\theta_{n'}$ sur l'horizontale permet de déterminer l'évolution de la poussée P_i sur l'écran en fonction de l'inclinaison du plan de rupture considéré.

La méthode de Culmann donne la résultante totale des poussées sur l'écran jusqu'au point A.

Afin de pouvoir tracer le diagramme des pressions s'exerçant sur l'écran, il y a lieu de recommencer le calcul de la résultante totale des poussées pour différentes positions du point A sur l'écran. Les différences de poussées entre deux positions consécutives permettent alors de déterminer le diagramme des poussées sous forme de pression sur l'écran.

Soit :

- σ_j : la pression au point A_j ;
- σ_{j-1} : la pression au point A_{j-1} ;
- Δ_{inc} : la distance entre deux points de discrétisation.

$$\sigma_j \text{ est donné par } \sigma_j = \frac{P_j - P_{j-1}}{\Delta_{inc}}$$

3.1.5.3

Poussée au repos ou poussée active

Pour les valeurs courantes de ϕ , c'est-à-dire comprises entre 25 et 40 degrés, le rapport K_o/K_a , égal en première approximation à $(1 - \sin\phi)/\tan^2\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\phi}{2}\right)$ pour une

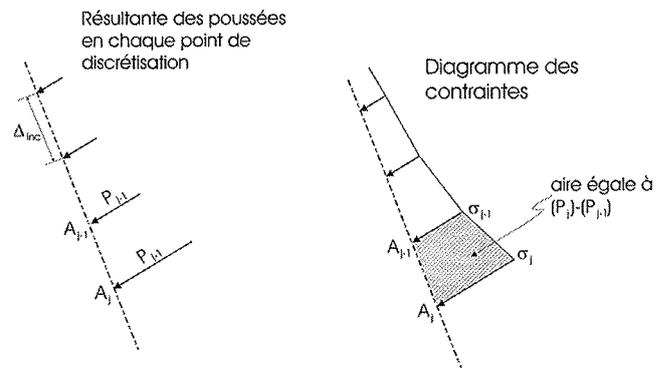


FIG. 8 Calcul des diagrammes de pression sur un écran.
Determination of the pressure diagrams on a wall.

contrainte horizontale est compris entre 1,42 et 1,64, soit environ 1,5 pour un angle de frottement courant de 30 degrés, valeur moyenne des bornes considérées.

En l'absence de tout déconfinement, la poussée exercée sur l'écran serait celle au repos et dans ce cas :

$$T_2 = 1,5P_A$$

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 exercée sur l'écran est donc :

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

$$\text{soit } T_2 = P_A \left[\frac{K_o}{K_a} + \frac{\delta}{\delta_A} \left(1 - \frac{K_o}{K_a} \right) \right]$$

Avec :

δ déplacement relatif mesuré lors de la réalisation de parois clouées ;

δ_A déplacement relatif de l'écran nécessaire pour atteindre l'état actif.

Le tableau C1 de l'Annexe C3 de la norme NF 1997-1-EC7 donne les mouvements nécessaires pour atteindre l'état actif : ces derniers sont compris entre 0,05H/100 et H/100 suivant l'état de densité d'un sol non cohérent et du type de déplacement du mur.

C.3 Mouvements nécessaires pour mobiliser les pressions limites des terres

(1) Il faut prendre en considération le mouvement nécessaire pour le développement d'un état limite de poussée dans un sol non cohérent derrière un mur de soutènement vertical retenant un massif de terrain à surface horizontale. L'amplitude de ce mouvement dépend du type de mouvement du mur et de la densité du sol. Le tableau C.1 donne l'ordre de grandeur du rapport v_s/h .

Tableau C.1 — Rapport v_s/h

Type de mouvement du mur		v_s/h sol lâche %	v_s/h sol dense %
a)		0,4 à 0,5	0,1 à 0,2
b)		0,2	0,05 à 0,1
c)		0,8 à 1,0	0,2 à 0,5
d)		0,4 à 0,5	0,1 à 0,2

Définitions
 v_s est le mouvement du mur nécessaire pour mobiliser la poussée des terres ;
 h est la hauteur du mur.

FIG. 9 Tableau C1 de l'Annexe C3 de la norme NF 1997-1-EC7.
 Table C1 / Appendix C3 from NF 1997-1-EC7 Standard.

Les déplacements relatifs mesurés lors de la réalisation de parois clouées sont donnés dans les Recommandations CLOUTERRE 1991 et varient dans une fourchette allant de 0,2H/100 à 0,4H/100 pour les sols.

TABLEAU I Ordre de grandeur des déplacements en tête d'un massif cloué.

	Soils semi-rocheux	Sables	Argiles
$d_v = d_h$	h/1 000	2H/ 1 000	4H/1 000
κ	0,8	1,25	1,5

Une borne supérieure de T_2 est donnée pour δ minimal et δ_A maximal, soit :

$$\frac{\delta}{\delta_A} = \frac{2H/1000}{0,5H/100} = 0,4$$

ce qui donne $T_2 = 1,3 P_A$.

Il est donc proposé de retenir comme valeur de la poussée sur l'écran :

$$T_2 = 1,3 P_A.$$

De la même façon que T_1 , T_2 est distribué entre les clous au prorata des surfaces reprises par chacun d'eux.

Si, par contre, toute déformation était bloquée par les dispositions constructives mises en œuvre (blocage des clous à la clé dynamométrique, parois mixtes avec tirants précontraints et clous passifs...), 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 $T_2 = 1,5 P_A$.

C'est pourquoi il paraît souhaitable que le concepteur puisse choisir et préciser le coefficient qui permet de passer de la poussée active calculée par la méthode de Culmann à la valeur effectivement appliquée sur l'écran en fonction des déplacements prévus de la paroi.

Ce coefficient varie donc de 1,0 à 1,5 et la valeur devrait être retenue en accord avec les considérations développées dans les paragraphes précédents.

Aux fins de comparaison avec T_0 et T_1 , la valeur de T_2 doit être pondérée par un coefficient de sécurité.

En résumé, la poussée active P_A est calculée par la méthode de Culmann sur l'écran fictif constitué par le parement. Cette poussée active est majorée dans le rapport K_0/K_a pour obtenir la poussée au repos P_0 sur le même écran. La valeur de T_2 est interpolée dans les murs cloués, entre la poussée au repos à déplacement nul et la poussée active nécessitant un déplacement $\delta = 0,5 \% H$. Enfin, cette dernière valeur de T_2 doit être pondérée par un coefficient de sécurité.

3.1.5.4

Comparaison avec la bibliographie

L'Additif 2002 aux Recommandations CLOUTERRE proposait que, sur les deux premiers lits de clous, le calcul soit réalisé

avec : $T_2 = 0,7 K_A \gamma h^2$

$$\text{soit : } T_2 = \frac{0,7}{0,5} P_A = 1,4 P_A$$

et que, sur les lits inférieurs, soit considérée la poussée active P_A .

La norme NF 94-270 sur les ouvrages en sol renforcé propose que la poussée appliquée sur l'écran soit la poussée active majorée sur toute la hauteur d'une contrainte horizontale constante telle que la poussée totale sur l'écran soit égale à la poussée au repos, ce qui revient à considérer que $T_2 = 1,5 P_A$ en vertu des considérations développées dans les paragraphes précédents. Cette dernière disposition paraît extrêmement sécuritaire et non conforme aux comportements et fonctionnements des ouvrages en sol renforcé.

Terzaghi et Peck (1967) ont proposé des diagrammes de pression à considérer pour le dimensionnement des blindages de fouille basés sur l'expérience :

– sables

$$P = 0,65 K_A H^2 \quad \text{soit } T_2 = \frac{0,65}{0,5} P_A = 1,3 P_A$$

– argiles molles et moyennement raides

$$P = 0,875 \left(1 - \frac{4Cu}{\gamma H} \right) \gamma H^2 \quad \text{soit } T_2 = \frac{0,875 \left(1 - \frac{4Cu}{\gamma H} \right) P_A}{0,5}$$

$$\text{soit } T_2 = 1,75 \left(1 - \frac{4Cu}{\gamma H} \right) P_A^{(1)}$$

– argiles raides

$$P = 0,15 \text{ à } 0,30 \gamma H^2 \quad \text{soit} \quad T_2 = \frac{0,15 \text{ à } 0,30}{0,5} = 0,3 \text{ à } 0,6 P_A$$

Byrne *et al.* (1998) (Fig. 5.17 p. 116) ont synthétisé les valeurs d'efforts mesurés au parement. 80 % des valeurs mesurées sont telles que $P \leq 0,6 K_A \gamma H^2$ avec des minimums à 0 et un maximum à $P = 1,5 K_A \gamma H^2$ soit $T_2 \leq 1,2 P_A$ pour 80 % des cas et $T_{2MAX} = 3 P_A$. Il préconise que les efforts au niveau du parement soient considérés comme égaux à $P = 0,5 K_A \gamma H^2$, soit $T_2 = 1,0 P_A$.

Gigan (1986) rapporte des pressions derrière l'écran égales à 60 % de la poussée active soit $T_2 = 0,6 P_A$.

Gudehus (1982), enfin, propose des valeurs T_2 variant de 1,0 à $1,2 P_A$.

Les valeurs proposées pour T_2 varient dans une fourchette très large, de $0,6 P_A$ à $1,2 P_A$, pour les auteurs ayant suivi ou rapporté des expérimentations de parois clouées.

CLOUTERRE, fondé sur l'expérimentation, et la norme NFP 94 270 proposent par contre des valeurs plus fortes, respectivement de 1,4 et 1,5.

Au vu des références bibliographiques et des développements proposés ci-avant, la valeur de $1,5 P_A$ proposée dans la norme NF 94-270 apparaît sécuritaire (ce que cette dernière reconnaît explicitement pour les sols cohérents) et la valeur proposée de $1,3 P_A$ apparaît être un meilleur estimatif pour les cas courants.

Toutefois, dans les sols ou roches tendres, évolutifs, gélifs, gonflants ou fortement sur-consolidés, une approche du comportement géotechnique de l'ouvrage doit justifier un autre choix.

3.1.5.5

Diagramme de poussée sur l'écran

Indépendamment de la valeur de la poussée sur l'écran, qui a fait l'objet de l'analyse développée au paragraphe précédent, se pose la question de la répartition des pressions sur l'écran correspondant à la force de poussée.

Selon les documents et les auteurs, la répartition à considérer pour distribuer la pression à partir de la valeur T_2 calculée peut varier de triangulaire (Additif CLOUTERRE) à trapézoïdale (Norme NF 94-270 et Terzaghi), voire rectangulaire (Terzaghi). Il est laissé à la latitude au concepteur de choisir le type de distribution.

3.2

Détermination de la longueur de scellement strictement nécessaire

Le but est de déterminer la longueur minimale de chaque lit de clous qui permet d'assurer la stabilité de la paroi.

L'optimisation proposée suppose que la longueur des clous est toujours conditionnée par T_{MAX} .

⁽¹⁾ Si l'on considère non pas la résistance au cisaillement non drainé C_u mais la cohésion effective c' , et que l'on s'intéresse à la variation du coefficient $t = 1,75 \left(1 - \frac{4c'}{\gamma H} \right)$ pour des valeurs de γ et H de 20 kN/m^3 et

$H = 5 \text{ m}$, la valeur de t varie entre 1,75 et 1,05 pour une cohésion effective variant entre 0 et 10 kPa, soit 1,4 en moyenne.

Pour cela, l'ensemble des longueurs possibles doit être parcouru en imposant des contraintes constructives et géométriques et déterminer le facteur de sécurité.

La solution optimale correspond à celle dont la somme des produits (longueur de clous x résistance maximale de l'armature) sera minimale. Ce critère permet de minimiser le poids d'acier utilisé.

$$\text{Solution} = \min \left(\sum_{\substack{\text{nclous} \\ \text{nSurfaces}}} T_{\max}(i) * L(i) \right)$$

La contrainte constructive supplémentaire imposée est que les longueurs de clous restent constantes ou diminuent du haut vers le bas.

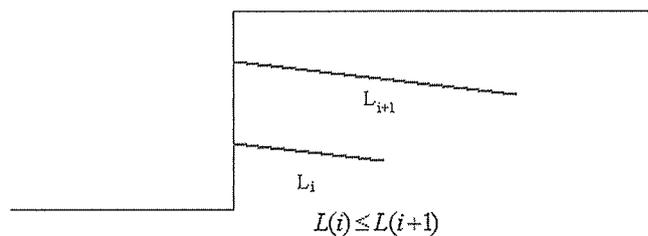


FIG. 10 Disposition constructive imposée sur la longueur des clous.

Constructive arrangement imposed to the length of nails.

L'algorithme d'optimisation utilise la théorie des graphes avec recherche par profondeur.

La méthode permet d'arriver rapidement à la première solution valide, et d'éliminer ainsi plus facilement des itérations.

Cet algorithme permet de parcourir toutes les solutions en éliminant le plus rapidement possible les « branches » que ne sont pas adéquates, c'est-à-dire ne répondant pas à la contrainte imposée ou dont la solution sera forcément moins optimale que celle trouvée précédemment.

Pour réduire le temps de calcul, il est apparu préférable d'itérer cet algorithme avec des valeurs de ΔL décroissantes, minimisant ainsi le nombre de combinaisons.

3.3

Détermination de la section d'armature initialement nécessaire

Connaissant l'effort T_{MAX} qui est strictement nécessaire pour obtenir le facteur de sécurité requis pour une surface de rupture, la section d'armature nécessaire pour la surface de rupture considérée est :

$$A_i = \frac{T_{MAX_i}}{\frac{\sigma_e}{\Gamma \sigma_e}}$$

La section d'armature strictement nécessaire est la section maximale d'armature de toutes les surfaces de rupture

$$A = \text{MAX} [A_i]$$

Lit de clous n° 1
(bas de la paroi)

Lit de clous n° 2

Lit de clous m

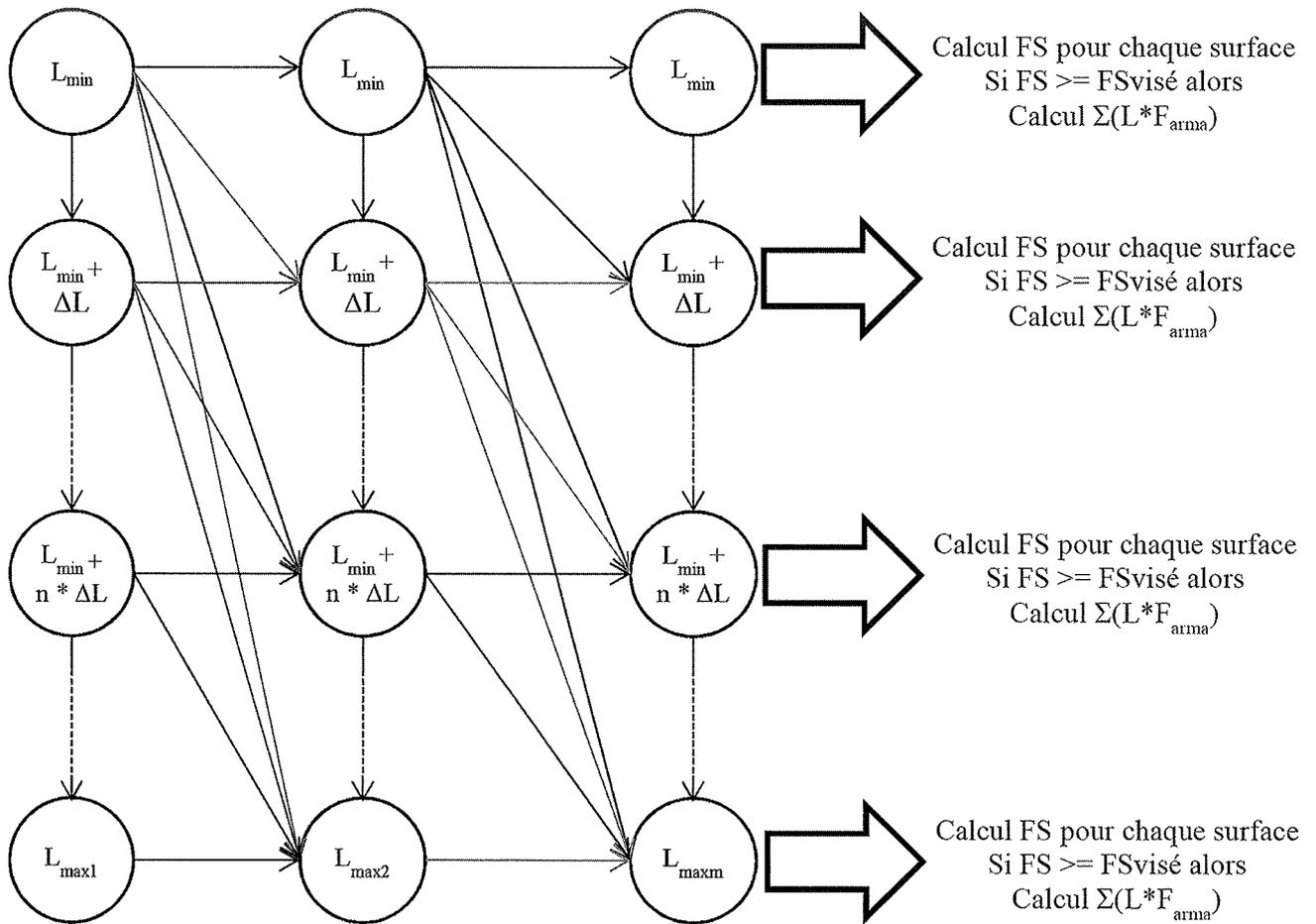


FIG. 11 Algorithme de recherche de longueurs.
Algorithm to reach optimized lengths of nails.

4

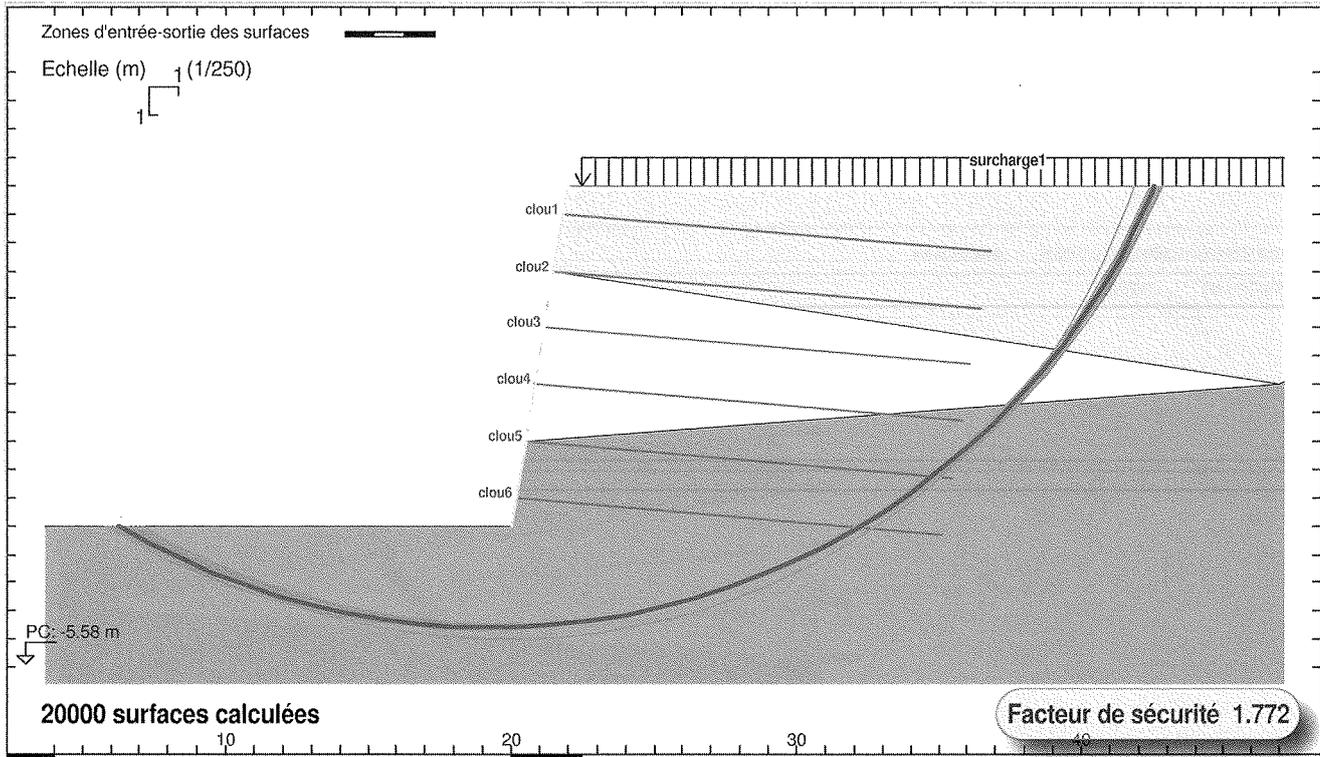
Application opérationnelle

Les propositions développées ci-avant ont été intégrées dans un logiciel de calcul de stabilité.

L'intégration de ces propositions permet non seulement de faire une vérification du caractère admissible du confortement proposé mais une optimisation de ce dernier par une détermination des longueurs et sections optimales et des efforts amenés au parement.

Un exemple des différentes étapes et sorties en est montré sur les figures ci-après. Le cas présenté a, pour des raisons de clarté, été conduit à l'état limite ultime, sans coefficients de sécurité partiels, en visant un facteur de sécurité global de 1,5.

La figure ci-dessous présente les résultats du calcul donnant les longueurs optimisées pour atteindre le facteur de sécurité visé de 1,5.



GEOSTAB® v4.07 du 10/10/2012 développé par GEOS
<http://www.geos.fr> E-mail: info@geos.fr

GEOS INGENIEURS CONSEILS, 72 r. G. de Mestral, Bât. Athéna 1
 Archamps Technopole, 74166 St. Julien en Genevois CEDEX - France

TEL: 04 50 95 38 14
 FAX: 04 50 95 99 36

SOLS	(γ ; γ_{sat})	C	ϕ	qs
1	(19.00; 19.00) * 1.00	0.000 / 1.00	28.50 / 1.00	120.0 / 1.00
2	(20.00; 20.00) * 1.00	5.000 / 1.00	33.50 / 1.00	190.0 / 1.00
3	(19.50; 19.50) * 1.00	0.000 / 1.00	28.00 / 1.00	70.00 / 1.00

Fichier "Publication_n"
 Méthode de BISHOP modifiée
 Classique
 Action des terres γ_e : 1
 Résistance des terres γ_r, e : 1
 Coefficient de Méthode 1
 Unités : kN, m

	Ytête	L	α	Esp	\emptyset	F arma
CLOU 1	11.0000	15.00	5.00	1.00	0.115	560.0 / 1.000
CLOU 2	9.00000	15.00	5.00	1.00	0.115	560.0 / 1.000
CLOU 3	7.00000	15.00	5.00	1.00	0.115	560.0 / 1.000
CLOU 4	5.00000	15.00	5.00	1.00	0.115	560.0 / 1.000
CLOU 5	3.00000	15.00	5.00	1.00	0.115	560.0 / 1.000
CLOU 6	1.00000	15.00	5.00	1.00	0.115	560.0 / 1.000

Longueurs initiales

Charges surfaciques et Forces linéaires					
	qg	qd	F	Gamm	θ
1	20.0	20.0		*1.00	0.00

N°	Xc	Yc	R	Fs	Fso	CL1 trac.	CL2 trac.	CL3 trac.	CL4 trac.	CL5 trac.	CL6 trac.
1	19.240	21.660	25.250	1.772	1.627	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	29.790	129.71
2	19.130	21.690	25.300	1.773	1.625	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	31.750	131.42
3	19.030	21.720	25.360	1.773	1.622	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	33.710	133.13
4	19.440	21.590	25.130	1.774	1.633	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	25.900	126.11
5	19.340	21.630	25.190	1.774	1.630	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	27.840	127.68
6	19.540	21.560	25.070	1.774	1.636	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	23.960	124.54
7	18.930	21.750	25.420	1.774	1.620	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	35.680	134.85
8	19.650	21.530	25.020	1.774	1.639	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	22.030	122.98
9	19.750	21.500	24.960	1.774	1.642	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	20.100	121.43
10	19.780	19.180	23.190	1.775	1.664	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	17.290	106.55
Long. des clous optim. (FS = 1.5, Lmin = 5) :						11.350	11.350	11.350	11.350	11.350	11.350

Longueurs finales optimisées pour FS = 1.5

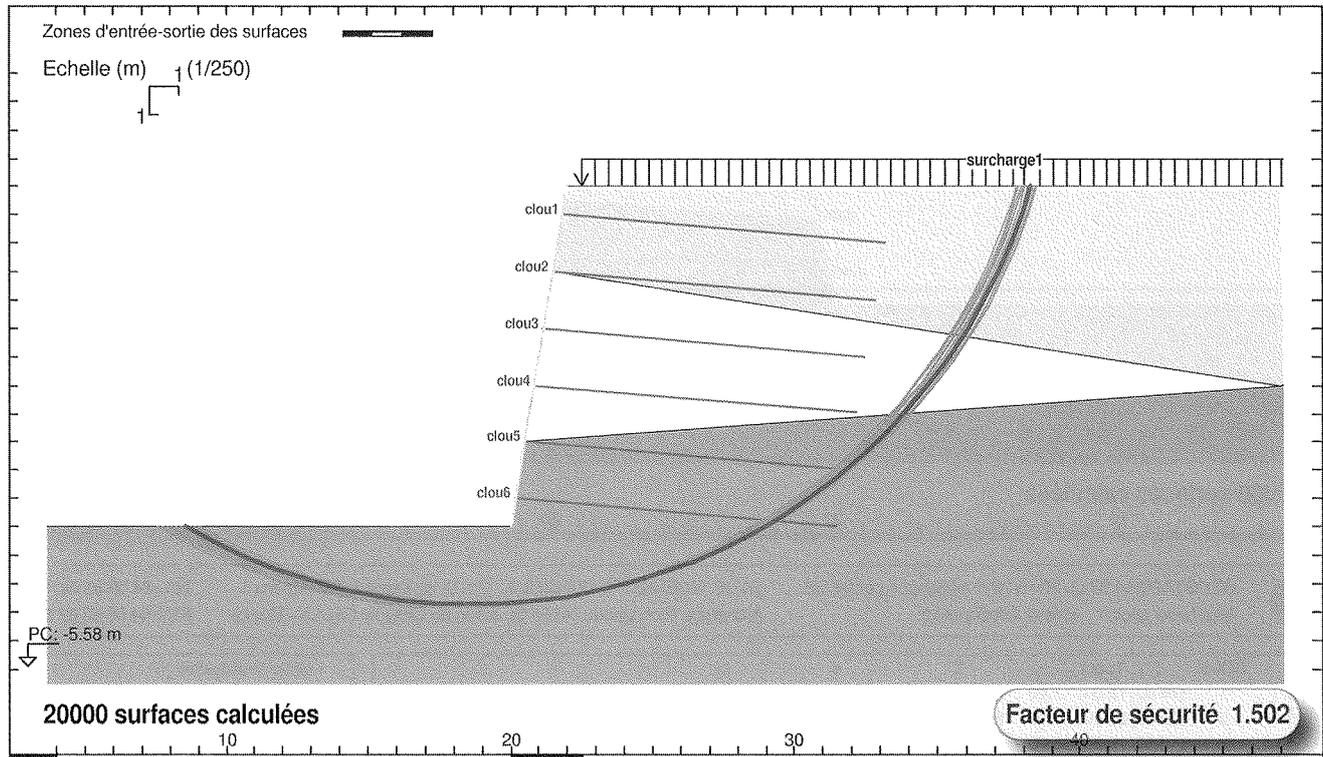
FIG. 12

Calcul de la longueur optimisée pour atteindre un FS visé.

Determination of the optimized length of the reinforcement to reach the safety factor.

La figure suivante présente les efforts T_{MAX} , T_{0r} , T_1 et T_2 obtenus en imposant les longueurs résultant des calculs de l'étape précédente et montre que ces

dernières sont suffisantes pour respecter le facteur de sécurité imposé.



GEOSTAB® v4.07 du 10/10/2012 développé par GEOS GEOS INGENIEURS CONSEILS, 72 r. G. de Mestral, Bât. Athéna 1 Archamps Technopole, 74166 St. Julien en Genevois CEDEX - France

SOLS	(γ ; γ_{sat})	C	ϕ	qs
1	(19.00; 19.00) * 1.00	0.000 / 1.00	28.50 / 1.00	120.0 / 1.00
2	(20.00; 20.00) * 1.00	5.000 / 1.00	33.50 / 1.00	190.0 / 1.00
3	(19.50; 19.50) * 1.00	0.000 / 1.00	28.00 / 1.00	70.00 / 1.00

Fichier "Publication_n"
Méthode de BISHOP modifiée
Classique
Action des terres γ_e : 1
Résistance des terres γ_r, e : 1
Coefficient de Méthode 1
Unités : kN, m

	Ytête	L	α	Esp	ϕ	F arma
CLOU 1	11.0000	11.35	5.00	1.00	0.115	560.0 / 1.000
CLOU 2	9.00000	11.35	5.00	1.00	0.115	560.0 / 1.000
CLOU 3	7.00000	11.35	5.00	1.00	0.115	560.0 / 1.000
CLOU 4	5.00000	11.35	5.00	1.00	0.115	560.0 / 1.000
CLOU 5	3.00000	11.35	5.00	1.00	0.115	560.0 / 1.000
CLOU 6	1.00000	11.35	5.00	1.00	0.115	560.0 / 1.000

Charges surfaciques et Forces linéaires				
qg	qd	F	Gamm	θ
1	20.0	20.0	*1.00	0.00

N°	Xc	Yc	R	Fs	Fso	CL1 trac.	CL2 trac.	CL3 trac.	CL4 trac.	CL5 trac.	CL6 trac.	Σ trac.
1	18.710	17.610	20.350	1.502	1.409	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	1.7500	97.390	99.140
2	18.600	17.630	20.380	1.502	1.404	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	4.8200	100.09	104.91
3	18.830	17.600	20.310	1.503	1.414	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	94.690	94.690
4	18.480	17.640	20.420	1.503	1.399	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	7.9000	102.81	110.71
5	18.360	17.660	20.460	1.504	1.395	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	10.990	105.53	116.52
6	18.250	17.680	20.490	1.505	1.391	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	14.090	108.27	122.36
7	18.940	17.580	20.270	1.506	1.419	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	92.010	92.010
8	18.130	17.690	20.530	1.507	1.387	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	17.190	111.01	128.20
9	18.010	17.710	20.570	1.508	1.383	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	20.310	113.77	134.08
10	19.060	17.570	20.240	1.508	1.424	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	89.340	89.340
Efforts maximums dans les clous (FS = 1.5) :						47.629	47.982	137.13	156.24	121.22	163.89	674.09
Efforts T0 (FS = 1.5) :						3.1660	2.4330	0.0000	14.309	48.866	105.10	173.88
Efforts T1 (FS = 1.5) :						23.133	23.133	2.9807	2.9807	2.9807	22.624	77.901
Efforts T2 (FS = 1.5; T2/Pa = 1.3; $\delta/\phi = 0$) :						70.052	149.31	149.64	149.64	149.14	68.954	736.73
Maximums T0, T1, T2 :						70.052	149.31	149.64	149.64	149.14	105.10	

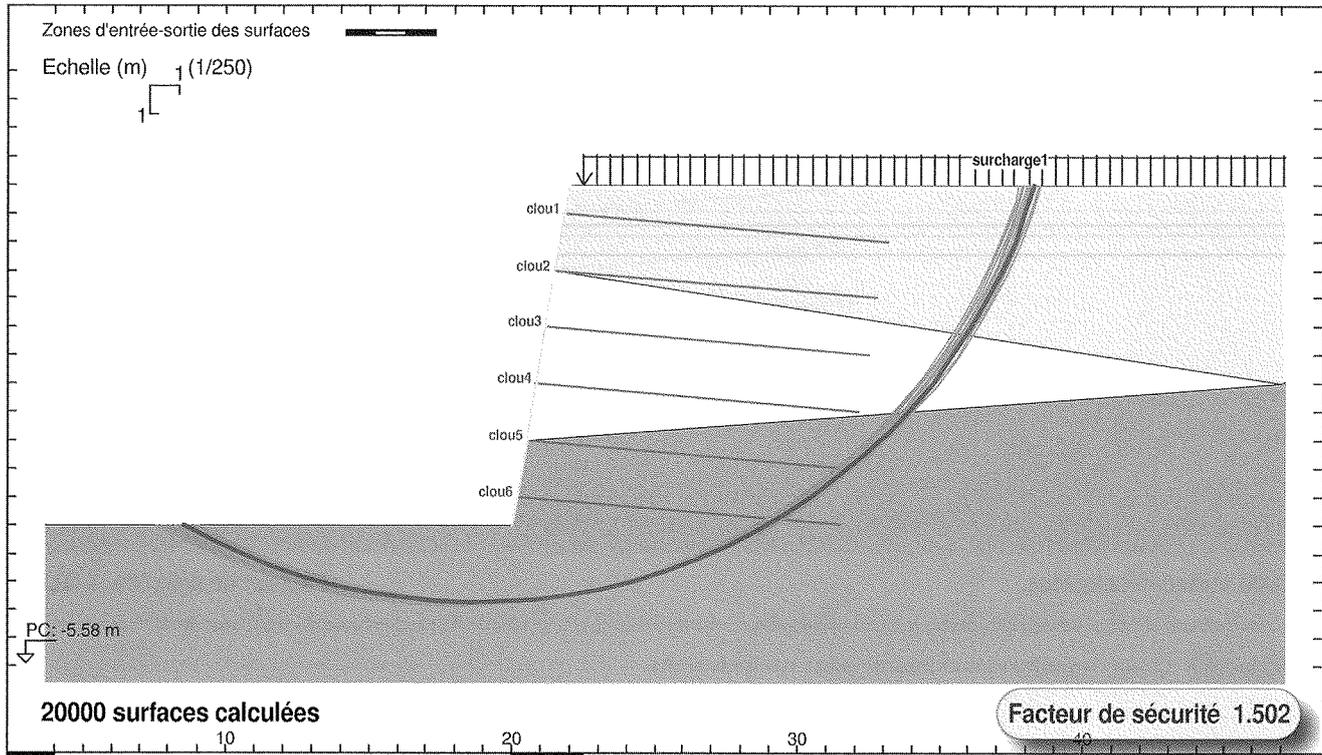
Efforts maximums dans les inclusions pour l'ensemble des surfaces analysées

Efforts maximums au parement

FIG. 13 Calcul des efforts maximums dans les inclusions T_{MAX} et des efforts appliqués au parement T_{0r} , T_1 , T_2 . Determination of the maximum efforts in the nail bars T_{max} and of the efforts applied to the face T_{0r} , T_1 , T_2 .

La figure ci-après présente le facteur de sécurité obtenu en imposant les longueurs et les résistances résultant des calculs précédents et montrant qu'elles

sont suffisantes pour atteindre le facteur de sécurité visé.



GEOSTAB® v4.07 du 10/10/2012 développé par GEOS
<http://www.geos.fr> E-mail: info@geos.fr

GEOS INGENIEURS CONSEILS, 72 r. G. de Mestral, Bât. Athéna 1
 Archamps Technopole, 74166 St. Julien en Genevois CEDEX - France

TEL: 04 50 95 38 14
 FAX: 04 50 95 99 36

SOLS	(γ ; γ_{sat})	C	ϕ	qs
1	(19.00; 19.00) * 1.00	0.000 / 1.00	28.50 / 1.00	120.0 / 1.00
2	(20.00; 20.00) * 1.00	5.000 / 1.00	33.50 / 1.00	190.0 / 1.00
3	(19.50; 19.50) * 1.00	0.000 / 1.00	28.00 / 1.00	70.00 / 1.00

Fichier "Publication_n"
 Méthode de BISHOP modifiée
 Classique
 Action des terres γ_e : 1
 Résistance des terres $\gamma_{r,e}$: 1
 Coefficient de Méthode 1
 Unités : kN, m

	Ytête	L	α	Esp	\emptyset	F arma
CLOU 1	11.0000	11.35	5.00	1.00	0.115	47.63 / 1.000
CLOU 2	9.00000	11.35	5.00	1.00	0.115	47.98 / 1.000
CLOU 3	7.00000	11.35	5.00	1.00	0.115	137.1 / 1.000
CLOU 4	5.00000	11.35	5.00	1.00	0.115	156.2 / 1.000
CLOU 5	3.00000	11.35	5.00	1.00	0.115	121.2 / 1.000
CLOU 6	1.00000	11.35	5.00	1.00	0.115	163.9 / 1.000

Résistance à la traction
 saisie correspondant
 aux efforts maximums
 de la page précédente

Charges surfaciques et Forces linéaires					
qg	qd	F	Gamm	θ	
1	20.0	20.0	*1.00	0.00	

N°	Xc	Yc	R	Fs	Fso	CL1 trac.	CL2 trac.	CL3 trac.	CL4 trac.	CL5 trac.	CL6 trac.	Σ trac.
1	18.710	17.610	20.350	1.502	1.409	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	1.7500	97.390	99.140
2	18.600	17.630	20.380	1.502	1.404	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	4.8200	100.09	104.91
3	18.830	17.600	20.310	1.503	1.414	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	94.690	94.690
4	18.480	17.640	20.420	1.503	1.399	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	7.9000	102.81	110.71
5	18.360	17.660	20.460	1.504	1.395	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	10.990	105.53	116.52
6	18.250	17.680	20.490	1.505	1.391	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	14.090	108.27	122.36
7	18.940	17.580	20.270	1.506	1.419	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	92.010	92.010
8	18.130	17.690	20.530	1.507	1.387	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	17.190	111.01	128.20
9	18.010	17.710	20.570	1.508	1.383	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	20.310	113.77	134.08
10	19.060	17.570	20.240	1.508	1.424	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	89.340	89.340
Efforts maximums dans les clous (FS = 1.5) :						43.611	43.934	125.56	143.06	110.99	151.33	618.49
Efforts T0 (FS = 1.5) :						0.0000	0.0000	0.0000	18.389	47.159	120.52	186.07
Efforts T1 (FS = 1.5) :						23.133	23.133	2.9807	2.9807	2.9807	22.624	77.831
Efforts T2 (FS = 1.5; T2/Pa = 1.3; $\delta/\phi = 0$) :						70.052	149.31	149.64	149.64	149.14	68.954	736.73
Maximums T0, T1, T2 :						70.052	149.31	149.64	149.64	149.14	120.52	

FIG. 14 Vérification du calcul des efforts maximums T_{max} dans les inclusions.
 Checking of the maximal efforts T_{max} in the nails.

La figure ci-après présente le lieu des efforts maximums dans les clous.

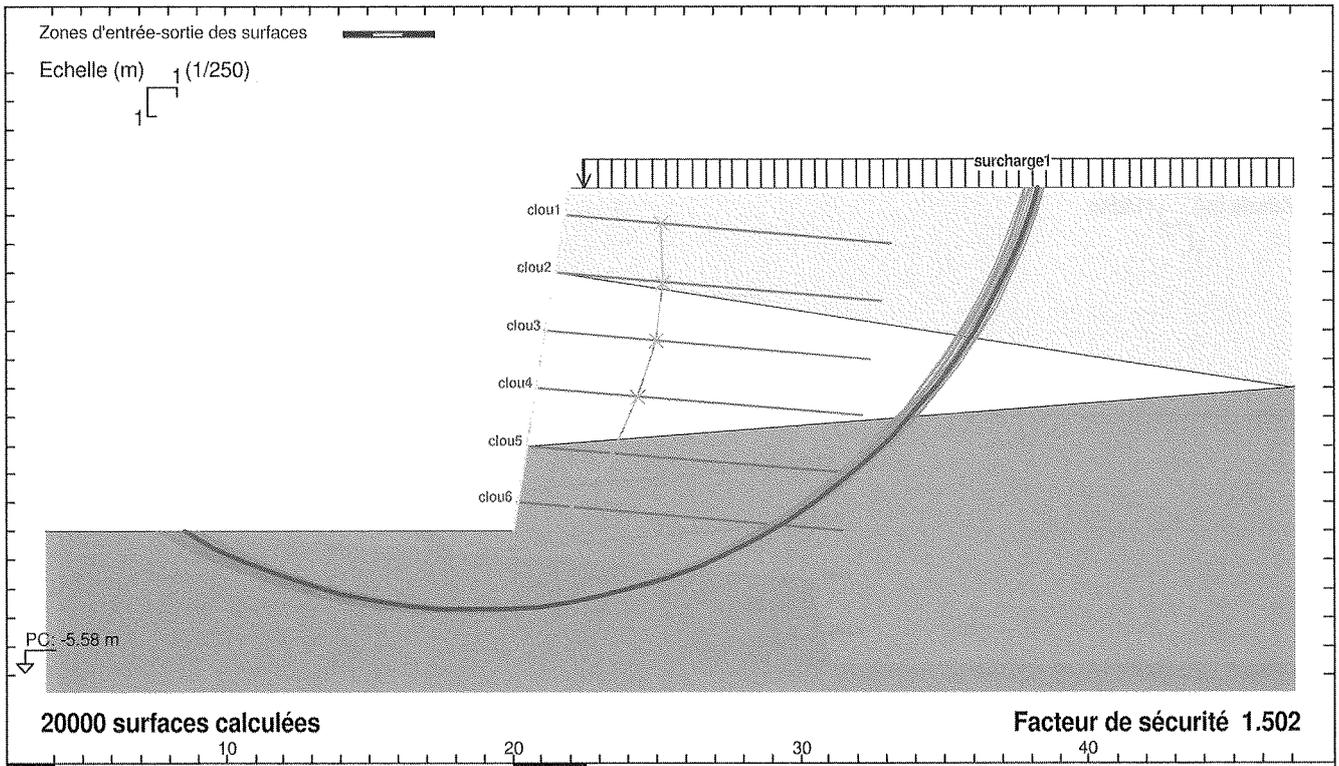


FIG. 15 Lieux des efforts maximums dans les inclusions.
Location of the maximum efforts in the nails.

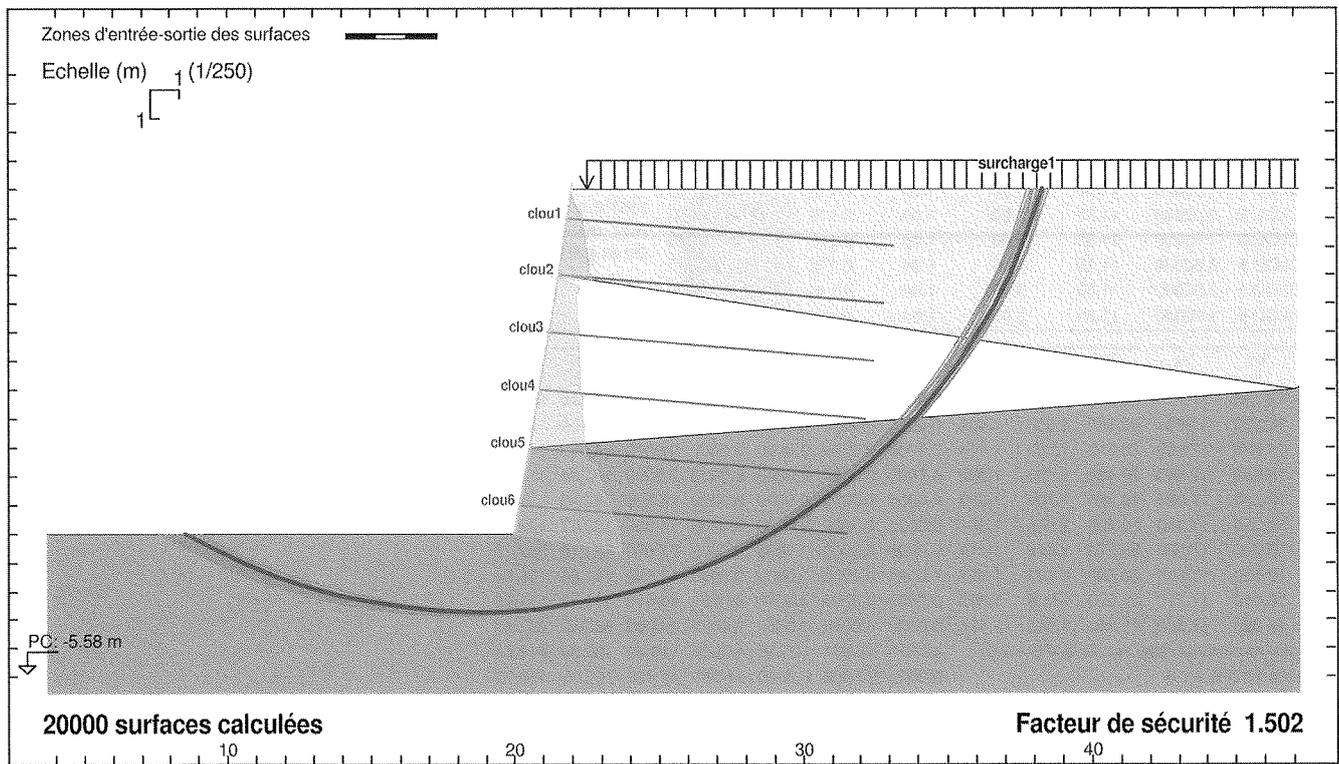


FIG. 16 Diagramme des pressions appliquées au parement calculées par la méthode de Culmann.
Diagram of pressure applied to the face according to Culmann's method.

Le diagramme de poussée active calculé par la méthode de Culmann est montré ci-dessous.

La figure ci-dessous présente le diagramme de pression déduit du choix du maximum T_0 , T_1 et T_2 redistribué sur le parement

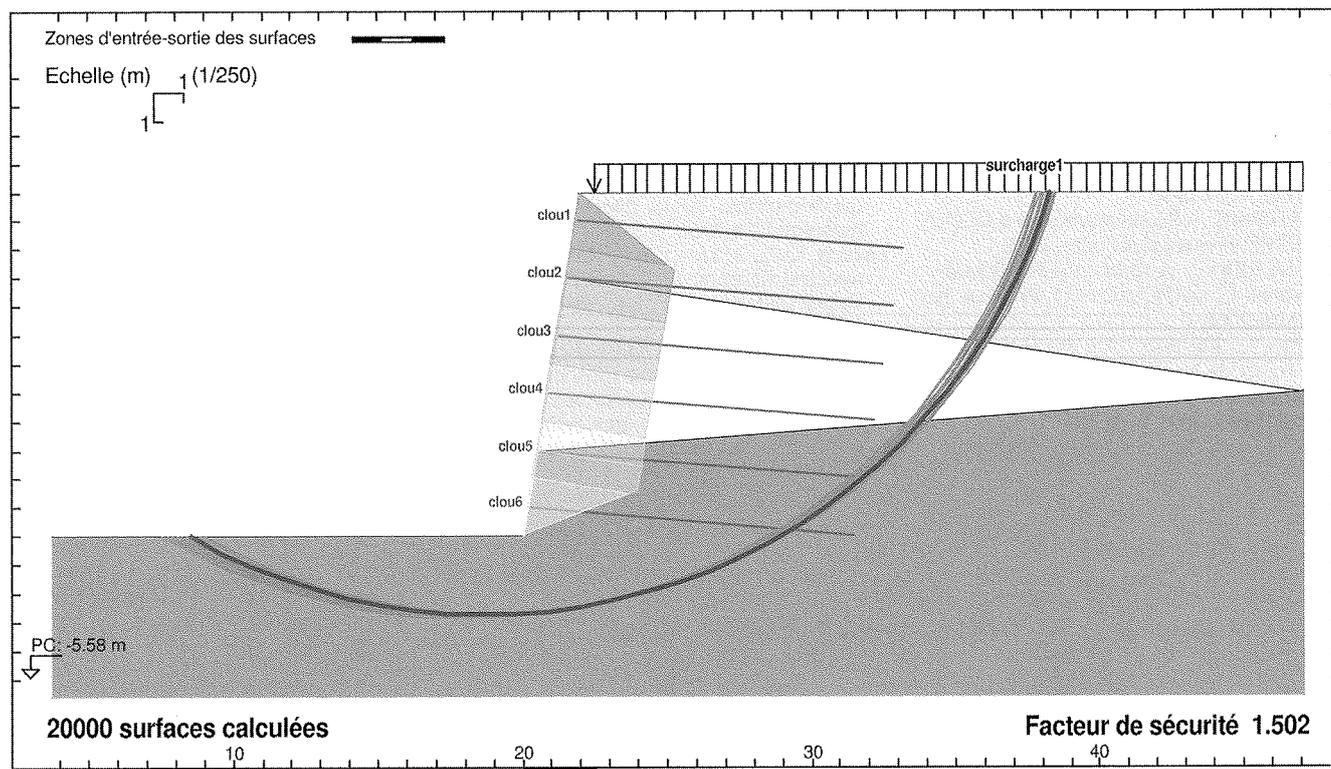


FIG. 17 Diagramme de pressions redéfini pour le calcul de l'effort T_2 .
Diagram of distributed pressure for the determination of the applied pressure to the face.

5

Conclusion

A partir d'un constat de la situation et d'un état de l'art portant sur le dimensionnement des parois clouées, il a été proposé des méthodes permettant de déterminer les longueurs et sections minimales d'armatures, d'optimiser le dimensionnement des inclusions et de déterminer les efforts ponctuels appliqués au parement par les têtes d'inclusions. L'application opérationnelle qui en a été faite s'avère permettre une optimisation économique intéressante du dimensionnement.

Il est recommandé de confronter cette optimisation à une étude de sensibilité du dimensionnement à une variation des paramètres prépondérants que sont l'angle de frottement et le frottement latéral unitaire limite.

Les cas particuliers des sols gonflants, gélifs, évolutifs doivent faire l'objet d'une étude particulière pour déterminer les pressions appliquées au parement.

REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à remercier MM. C. Chapeau et A. Ménoret qui ont bien voulu nous faire part de leurs critiques constructives, avis, conseils et remarques éclairées après des relectures minutieuses.

Bibliographie

- Blondeau F., et al. – *Méthode de calcul des ouvrages en terre renforcée – Renforcement en place des sols et des roches*. Comptes rendus du colloque international, Presses des Ponts, Paris, 9-11 octobre 1984.
- Byrne R.J., et al. – *Manual for design and construction monitoring of soil nail walls*. Report FHWA-SA-96-69R, 1998.
- Chapeau C. – Communications personnelles, 2011-2012.
- CLOUTERRE – *Recommandations CLOUTERRE*. Presses des Ponts, 1991.
- CLOUTERRE – *Additif aux Recommandations CLOUTERRE 1991*. Presses des Ponts, 2002.
- Delattre L., Martens – Un siècle de calcul d'écran de soutènement – *Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées* n° 244-245, 2003, p. 31-51.
- Fau D. – *Le clouage des sols-Application au soutènement de fouille-Étude expérimentale et dimensionnement*. Thèse ENPC, 1987.
- Gigan J.-P. – Applications du clouage en soutènement-Paramètres de conception et de dimensionnement des ouvrages. *Bulletin de Liaison des Ponts et Chaussées*, 143, mai-juin 1986.
- Gudehus G. – Clouage des sols : règles de dimensionnement et leur vérification expérimentale. *Revue française de géotechnique*, 19, 1982, p. 24-37.
- Lazarte C.A., et al. – Geotechnical Engineering Circular n° 7 Soil Nail Walls. Report FHWA, DTEH61-00-C-00109, 2003.
- Marche M., Favre M. – Dimensionnement et fluage à moyen terme d'un mur cloué de grande hauteur. *Conférence Société Suisse de Mécanique des Sols et des Roches*, Berne, 23 avril 1999.
- Menoret A. – *Communications personnelles 2011-2012*.
- Sayao A.S.F.J., et al. – Aspects de projet et instrumentation d'un talus cloué de 40 m de hauteur. *International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Osaka, septembre 1995.
- Terzaghi K., Peck E.B. – *Soil Mechanics in engineering practice New York*. John Wiley & Sons, Second edition, 1967.
- Tschebotarioff G.P. – « Ouvrages de soutènement », chapitre 5 in G.A. Leonards, *Les Fondations*, Dunod, 1968.
- Vezole P., et al. – *Calcul géotechnique-Ouvrages de soutènement-Remblais renforcés et massifs en sol cloué*. NF 94-270, AFNOR, 2009.