

ETUDE D'UNE SOLUTION HYBRIDE DE PAROI CLOUEE RENFORCEE PAR DEUX RANGEES DE MICROPIEUX

STUDY OF A HYBRID NAILED-WALL SOLUTION REINFORCED BY TWO ROWS OF MICROPILES

Axel Desmontais ¹, Hamid Hosseini-Sadrabadi ¹, Clément Caillet ¹, Daniel Dias ², Pierre Riegel ¹

¹ *Equaterre, Bureau d'étude ingénierie 74960 Meythet, France*

² *Univ. Grenoble Alpes, CNRS, Grenoble INP, 3SR F-38000 Grenoble, France*

RÉSUMÉ – Cet article présente l'étude numérique d'une solution de soutènement hybride pour répondre à des problématiques dans des contextes montagneux. L'ouvrage étudié est composé d'une paroi clouée avec des longueurs de clous fortement limitées et renforcée par deux rangées de micropieux liaisonnés en tête par un massif en béton armé.

ABSTRACT – This article presents the numerical study of a hybrid retaining wall solution to solve problems in mountainous contexts. The structure studied consists of a nailed wall with very limited nail lengths, reinforced by two micropile rows connected at the top by a reinforced concrete structure.

1. Introduction

L'attractivité des sports d'hiver a impulsé le développement important de l'urbanisation des stations de montagne depuis plusieurs décennies. Le prix à la vente du m² pouvant être très élevé, l'optimisation des surfaces habitables en réalisant de nombreux niveaux enterrés nécessite la mise en place d'ouvrages de soutènement d'une hauteur toujours plus grande.

La technique de la paroi clouée s'adapte particulièrement bien au contexte contraignant de l'environnement en montagne. Sur les 30 dernières années, la paroi clouée est devenue la solution la plus utilisée pour les travaux de soutènement sur la grande majorité des stations des Alpes françaises.

La stabilité d'une paroi clouée est assurée par le renforcement du massif de sol à l'aide de clous d'une certaine longueur et d'un certain maillage. Sa mise en place nécessite cependant un recul suffisant.

Aujourd'hui, la densification des stations en montagne a atteint un tel niveau que cette solution est de plus en plus complexe à mettre en œuvre, notamment à cause des longueurs limitées de clous. Certaines autorisations d'utilisation des tréfonds pouvant être refusées.

Dans ce contexte, il arrive parfois que les longueurs de clous réalisables soient trop faibles, rendant l'utilisation d'une paroi clouée classique injustifiable.

Le présent article met en évidence les différents rôles que peuvent avoir les micropieux dans des solutions de stabilisation de pentes et d'ouvrages de soutènement. Il expose ensuite l'étude d'une solution hybride de soutènement composée d'une paroi clouée avec des clous de faible longueur, renforcée par deux rangées de micropieux liaisonnés en tête. La contribution à la stabilité des différents éléments composant cet ouvrage de soutènement hybride (clous et micropieux) est présentée afin de proposer une solution viable. L'analyse de sensibilité de cette solution et l'étude des déplacements engendrés par cet ouvrage sont aussi abordées dans cet article.

2. Les solutions de soutènement en montagne

Les projets de construction dans les stations des Alpes françaises s'encastrent souvent dans la pente en engendrant les problématiques suivantes (voir Figure 1) :

- Difficultés d'accès pour les machines,
- Forte hauteur de décaissement à l'amont,
- Plusieurs niveaux de plateformes en cascade.

L'ensemble de ces problématiques amène une complexité importante dans la réalisation d'ouvrages butonnés.



Figure 1. Avant et après travaux de parois clouées - TIGNES LES BREVIERES (73)

Les sols majoritairement rencontrés sont des sols morainiques, issus de l'activité passée des glaciers, qui peuvent contenir des blocs pluri-métriques au sein d'une matrice fine.

Dans la pratique, les solutions habituelles d'écrans de soutènement (paroi berlinoise, paroi de pieux, paroi moulée, etc.) ne sont pas adaptées à cause de la très faible mobilité des machines. De plus, la présence de blocs pluri-métriques dans le sol impacte les méthodes de forage et rallonge fortement les délais d'exécution, rendant ces solutions non viables aux impératifs de délais des projets en montagne.

La solution de soutènement la plus adaptée est donc la paroi clouée profondée qui peut être réalisée dans des sites difficiles d'accès grâce à des machines très mobiles.

Avec l'urbanisation croissante des stations, se pose alors la question : comment la solution de paroi clouée peut s'adapter dans des contextes où les longueurs de clous sont fortement limitées ?

3. Etat de l'art des parois clouées profondées en contexte de montagne

Le projet national (CLOUTERRE) a permis l'essor des parois clouées en France depuis trois décennies. Comme l'explique (FAU, 1987), le principe des parois clouées est de renforcer le massif de sol en place à l'aide de clous subhorizontaux afin de lier la zone dite active du mécanisme de rupture à la zone résistante.

Pour des configurations classiques, les mécanismes de rupture pour la vérification de la stabilité mixte sont souvent pris comme étant des mécanismes de rupture circulaire ou plane monobloc passant par le pied de paroi. Cependant, certains mécanismes peuvent être plus défavorables (DE SAUVAGE, 2018).

A l'aide de la méthode cinématique du calcul à la rupture, un mécanisme de rupture plus défavorable qui est composé de deux blocs rigides et d'une zone de plasticité au niveau du pied de paroi a été exploré par (SIMON, 2008).

Ces mécanismes de rupture multiblocs sont aussi décrits plus explicitement dans la version 2020 de la NF P94-270 (VOLCKE & VALDEYRON, 2020) comme le montre la Figure 2.

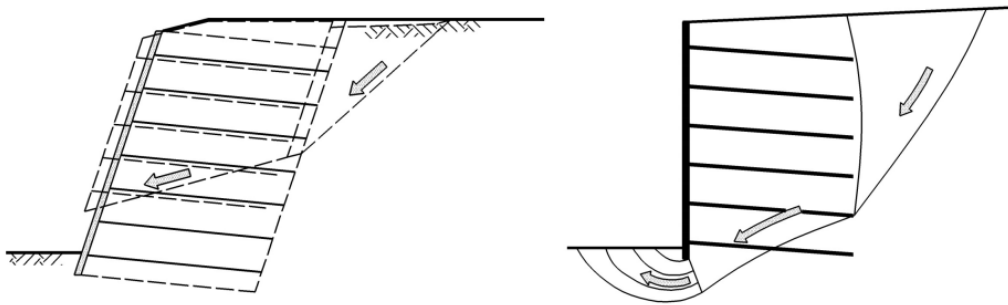


Figure 2. Exemples de mécanismes de rupture mixte « deux blocs » et « trois blocs » selon la NF P 94-270 (VOLCKE & VALDEYRON, 2020)

4. La paroi « Hurpinoise »

Les parois Hurpinoises, dont le principe est cité dans (CLOUTERRE), sont des parois clouées avec une densité de clouage plus forte et des longueurs de clous plus faibles (initialement des cornières battues) que les parois clouées. Le principe de cette méthode comme le souligne (FAU, 1987) est de créer un massif de sol renforcé se comportant de manière monolithique et pouvant être autostable afin de reprendre la poussée du sol non renforcé à l'amont.

Dans la pratique, les parois hurpinoises sont beaucoup plus sujettes aux mécanismes de rupture mixte multiblocs et aux mécanismes de rupture externes locaux à cause de leur élancement. À l'instar des murs poids, la limite de faisabilité est atteinte lorsque l'élancement du massif de sol cloué devient trop important pour justifier la stabilité externe locale, voire plus spécifiquement la stabilité mixte multiblocs pour les parois clouées.

5. Utilisation des micropieux

5.1. Principe de stabilisation de pente par groupe de micropieux

Les micropieux se sont grandement démocratisés depuis les années 1950 et ils sont notamment utilisés dans la stabilisation des pentes. Les méthodes de dimensionnement ont évolué sans cesse comme le décrivent (SUN et al., 2013). Il apparaît que les micropieux se comportent de manière différente des pieux de plus gros diamètre utilisés pour stabiliser les pentes comme le montrent (SUN et al., 2009). Les micropieux avec leur inertie beaucoup plus faible, subissent des déformations de flexion de part et d'autre de la surface de rupture.

Ce comportement en flexion a été décrit par (YANG et al., 2021) (voir Figure 3).

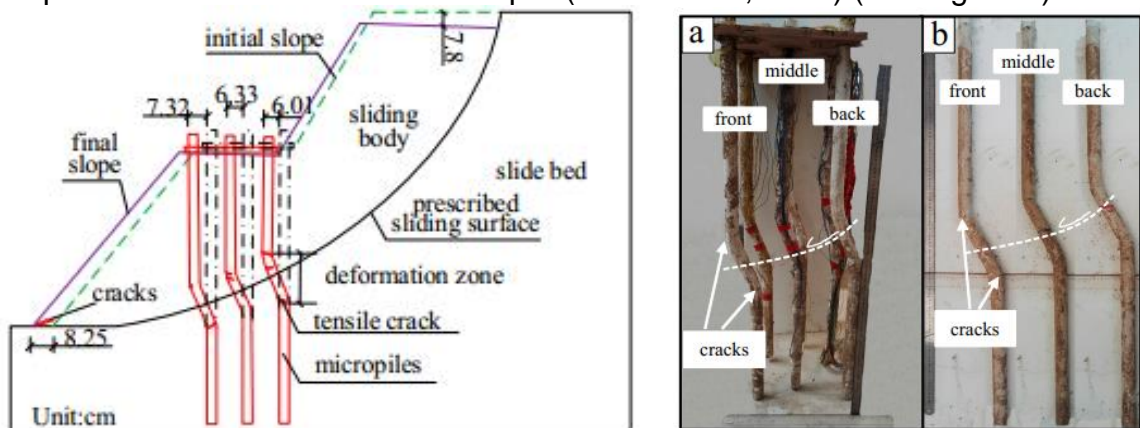


Figure 3. Schéma de la rupture et photos des micropieux après chargement statique et dynamique (YANG et al., 2021)

La distribution du moment fléchissant le long des micropieux, obtenue par auscultation, indique que les moments fléchissant maximums se situent de part et d'autre la surface de rupture, engendrant ainsi la flexion des micropieux (Figure 3).

5.2. Utilisation des micropieux en soutènement

Les micropieux liaisonnés en tête sont aussi utilisés en tant qu'ouvrages de soutènement. (JANES, 2014) a détaillé la réalisation d'un soutènement de 4.5 m de hauteur à l'aide de deux rangés de micropieux verticaux et d'un micropieu incliné, tous liaisonnés en tête. L'analyse numérique a montré que les micropieux verticaux travaillent en flexion-compression. Les moments fléchissant prépondérants se situent juste au-dessus et en-dessous du pied de paroi. Ces résultats sont similaires au comportement observé des micropieux en stabilisation de pente où les moments fléchissant les plus importants se situent de part et d'autre de la surface de rupture.

L'inclinaison des micropieux permet d'améliorer la stabilité et de diminuer les déplacements ainsi que les moments au sein des micropieux (YUENAN et al., 2022).

Ils peuvent aussi être utilisés en renforcement de parois clouées comme le présentent (BISHOP et al., 2009). Une solution de reprise en sous-œuvre en paroi clouée avec l'utilisation de plusieurs micropieux liaisonnés en tête a permis de limiter les déplacements à 1 cm pour un décaissement de 13 m. Ce rapport de déplacement est en deçà des rapports standards de 2 à 4h/1000 (avec h la hauteur de la paroi) indiqués pour les parois clouées par (CLOUTERRE) et repris par la NF P 94-270 (VOLCKE & VALDEYRON, 2020).

6. Principe de la solution Talustaine et modèle d'étude

La solution de soutènement, appelée « Talustaine » est étudiée dans cet article. Son appellation est tirée du nom déposé « Talluestaine ». Ce type de paroi est composée d'une paroi clouée avec des clous de faibles longueurs, renforcée par des micropieux liaisonnés en tête par un massif en béton armé. Le modèle d'étude adopté est caractérisé par un soutènement vertical de 12 m de haut. La limite de propriété est située à 4 m de l'ouvrage et il est proscrit de mettre en place des éléments de renforcement au-delà. Plusieurs configurations de micropieux sont étudiées pour déterminer la plus optimale (voir Figure 4).

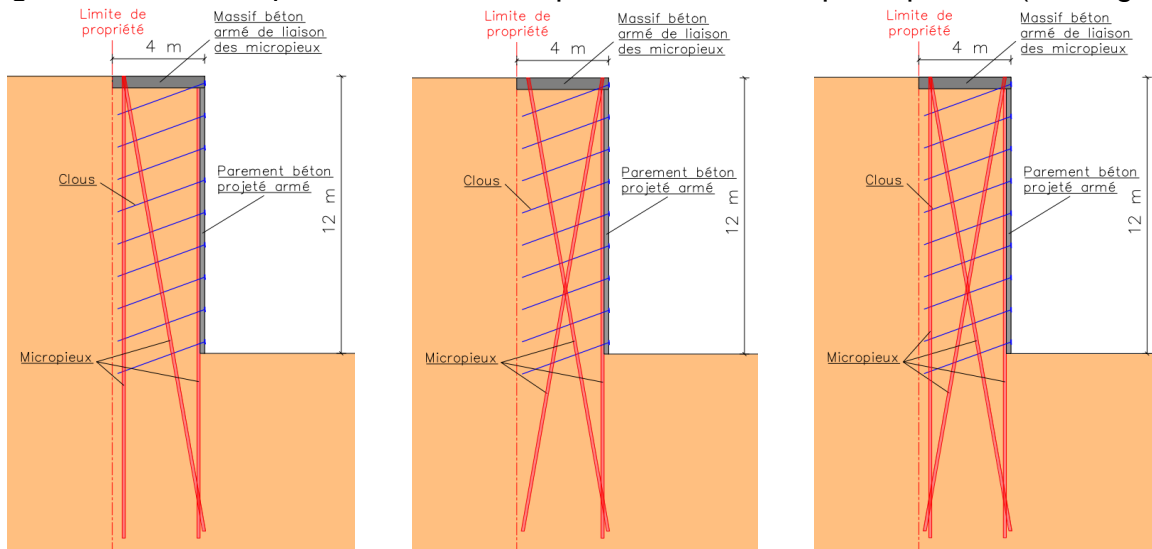


Figure 4. Configurations de la paroi hybride « Talustaine » (N à gauche, X au centre et IX à droite)

7. Modélisation aux éléments finis - PLAXIS 2D

L'étude a été menée sur le logiciel PLAXIS 2D. Le modèle de sol est considéré comme homogène, ses propriétés sont basées sur l'expérience d'EQUATERRE dans les stations des Alpes françaises (Tableau 1).

Tableau 1. Caractéristiques géomécaniques du sol du cas d'étude

γ (kN/m ³)	φ (°)	c (kPa)	$E_{50,réf}$ (MPa)	$E_{\text{œd},réf}$ (MPa)	$E_{50,réf}$ (MPa)	q_s (kPa)
20	30	10	100	100	300	150

Les micropieux ont une longueur de 20 m. Leur entraxe horizontal est de 1 m pour le micropieu du parement et de 0,5 m pour les autres micropieux. Les clous mesurent 4 m et ont un entraxe vertical et horizontal de 1,4 m avec une inclinaison de 20°.

La loi de comportement *Hardening Soil Model* a été utilisée pour caractériser le sol dans le but de modéliser de manière la plus réaliste les déformations et la plastification du sol à l'arrière de l'écran. Le phasage de réalisation est intégré dans la modélisation numérique.

8. Déroulement de l'étude

Le déroulement de l'étude suit le schéma de la Figure 5.

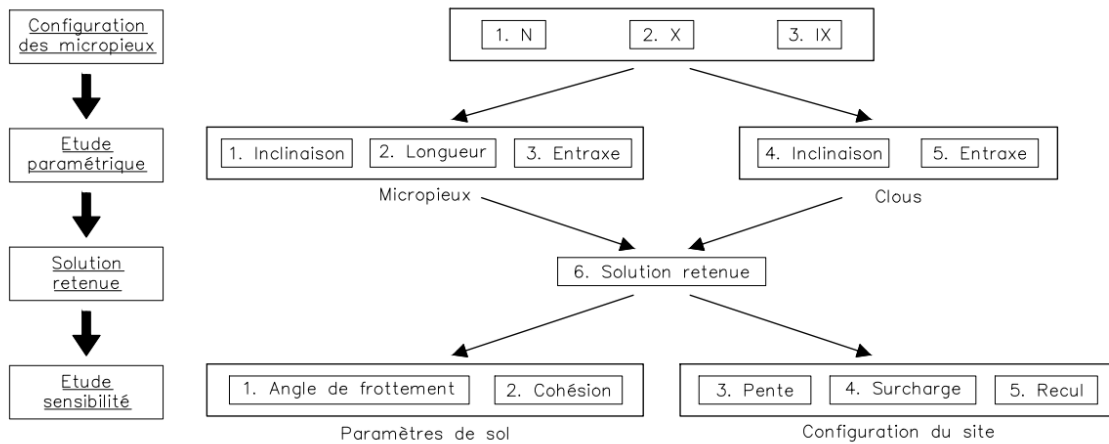


Figure 5. Schéma du déroulement de l'étude paramétrique

L'objectif est d'aboutir à une solution finale justifiée par un coefficient de sécurité $F_s = 1,5$ avec l'approche unitaire traditionnelle. L'analyse de la stabilité est menée à l'aide de la méthode $c-\phi$ réduction. La démarche équivaut à la justification d'une paroi clouée considérée comme un ouvrage sensible selon la NF P 94-270 (VOLCKE & VALDEYRON, 2020) avec les pondérations de l'approche 3 de calcul (voir équation 1).

$$F_s = (\Gamma_{\tan \phi} ; \Gamma_{\tan c}) \times \Gamma_{Rd} = 1,25 \times 1,2 = 1,5 \quad (1)$$

9. Etude des différentes configurations

L'étude numérique des trois configurations montre (Figure 6) l'apparition du mécanisme de rupture multiblocs comme décrit dans la NF P 94-270 (VOLCKE & VALDEYRON, 2020) et présenté à la Figure 3.

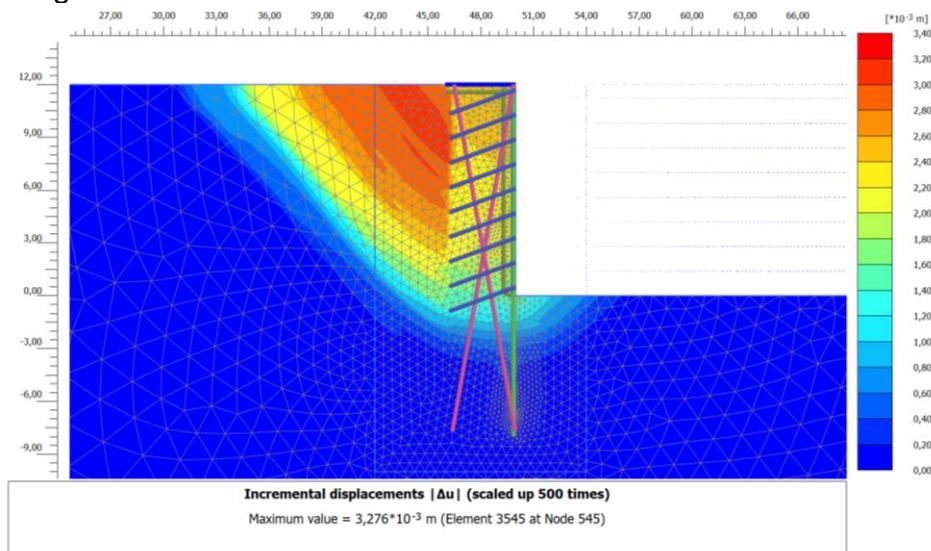


Figure 6. Répartition des déplacements incrémentaux (2.X)

La solution la plus optimale est la solution en X d'après les résultats des coefficients de sécurité illustrés dans le Tableau 2.

Tableau 2. Coefficients de sécurité F_s obtenus pour les 3 configurations de micropieux étudiées

Configuration	1. N	2. X	3. IX
F_s	1.39	1.45	1.42

La configuration IX possède un coefficient de sécurité inférieur à la configuration X malgré la présence d'un micropieu de renforcement supplémentaire. Cela s'explique en partie car les micropieux qui s'entrecroisent (micropieux amont vertical et micropieu incliné de la paroi) entrent en interaction et voient leur frottement avec le sol réduit.

10. Etude paramétrique

10.1. Micropieux

L'étude paramétrique a été réalisée sur la configuration X car considérée comme la plus optimale. L'augmentation de l'inclinaison et de la longueur des deux micropieux en X améliore le coefficient de sécurité comme illustré avec la Figure 7 et la Figure 8.

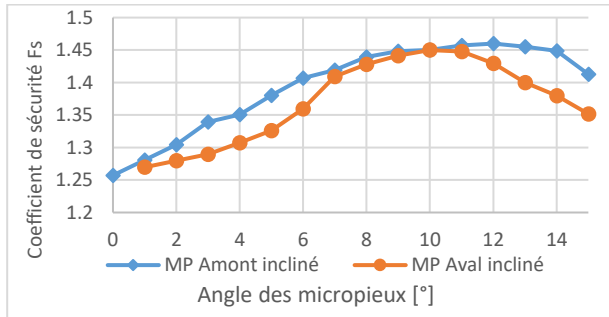


Figure 7. Evolution du coefficient de sécurité en fonction de l'inclinaison des micropieux

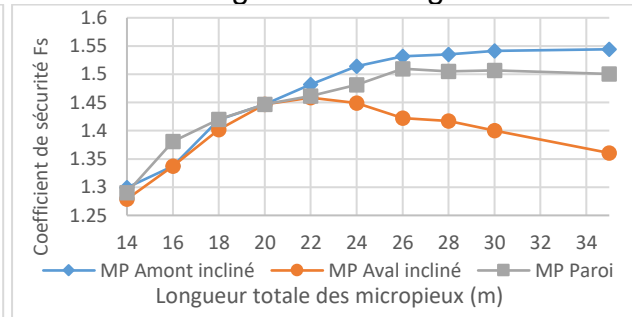


Figure 8. Evolution du coefficient de sécurité en fonction de la longueur des micropieux

La longueur du micropieu aval incliné doit être réduite à partir d'un certain angle (et inversement pour l'inclinaison) afin de ne pas dépasser la limite de propriété. Cela explique la diminution du coefficient de sécurité à partir d'une certaine valeur d'inclinaison et de longueur pour les graphiques de la Figure 7 et de la Figure 8.

La diminution de l'entraxe horizontal des micropieux permet aussi d'améliorer le facteur de sécurité de manière notable.

10.2. Clous

L'étude paramétrique sur le rôle des clous dans la stabilité indique que ceux-ci ont un impact modéré. La variation de l'inclinaison ou de l'entraxe sur une plage de valeurs étendue ne joue que peu sur le coefficient de sécurité comme le présente la Figure 9.

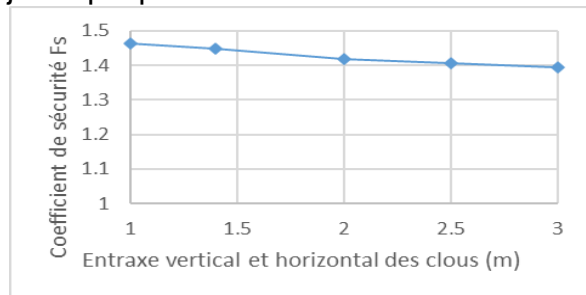


Figure 9. Evolution du coefficient de sécurité F_s en fonction de l'entraxe des clous

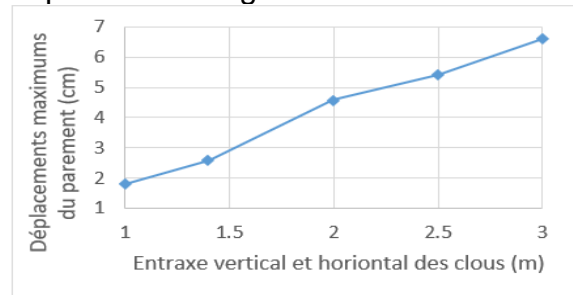


Figure 10. Evolution des déplacements maximums de la paroi en fonction de l'entraxe des clous

La Figure 10 montre cependant que les clous, et leur entraxe en particulier, ont un rôle majeur sur la détermination des déplacements de l'ouvrage.

Réduire le maillage des clous permet aussi de diminuer l'effort normal et le moment fléchissant qui apparaissent au sein des micropieux.

Les clous ont donc aussi un rôle indispensable, surtout dans des contextes urbanisés où les tassements à l'arrière des soutènements sont à maîtriser.

11. Etude de sensibilité de la solution retenue

L'étude paramétrique indique que l'allongement du micropieu amont incliné de 3 m permet d'atteindre un coefficient de sécurité de 1,5 (voir Figure 8).

L'analyse de sensibilité de cette solution expose que la variation des paramètres de sol ϕ et c impacte directement le coefficient de sécurité. Une diminution de l'angle de frottement de 5° entraîne une perte de 13% du coefficient de sécurité. Quant à la cohésion, une réduction de 5 kPa entraîne une diminution de plus de 10% du coefficient de sécurité.

La présence d'une pente à l'amont impacte aussi directement la stabilité de l'ouvrage. Elle engendre une augmentation du poids du bloc se décrochant à l'amont (effort déstabilisateur) sans modifier les efforts stabilisateurs (poids du bloc central et de la butée au niveau du fond de fouille). La présence d'une pente de 1V/2H ($\approx 26,6^\circ$) à l'amont engendre une diminution du coefficient de sécurité de plus de 25 %.

Tout comme pour la pente, la présence de surcharges proches apporte une poussée supplémentaire déstabilisatrice sur le bloc central. Au-delà d'une distance de 15 m depuis l'extrémité du massif béton armé, la présence de surcharge n'a plus d'impact significatif sur le coefficient de sécurité.

La variation du recul entre le soutènement et la limite de propriété à partir duquel il est proscrit de mettre en place des éléments de renforcement modifie directement le volume du bloc central et donc le poids de celui-ci qui est un effort stabilisateur important. Le recul de la limite de propriété influe considérablement sur le coefficient de sécurité avec une chute de 23 % du coefficient de sécurité lors d'une réduction de cette distance de 4 m à 2 m.

12. Etude des déplacements de la solution retenue

Dans les contextes urbanisés, le critère dimensionnant des soutènements est souvent le seuil de déplacements admissibles pour les ouvrages proches. La cuvette de tassements obtenue à l'arrière de la paroi pour la solution proposée est comparée à celle d'une paroi clouée verticale avec micropieu de profondément et des longueurs de clous « classique » (12 m). La comparaison entre les deux cuvettes de tassements est présentée par la Figure 11.

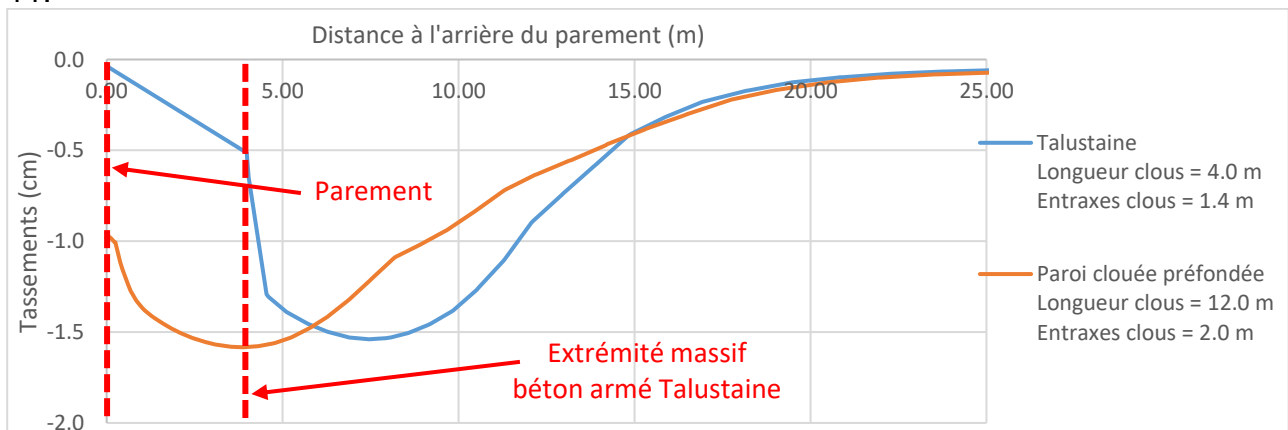


Figure 11. Comparaison des cuvettes de tassements entre la solution Talustaine et une paroi clouée préfondée « classique »

La cuvette de tassements de la solution Talustaine est similaire à celle de la paroi clouée classique mais débute à partir de l'extrémité du massif béton armé. De ce fait, les déplacements les plus prépondérants se situent plus loin du parement que pour la paroi clouée « classique ». Pour rappel, les déplacements de la Talustaine sont fortement déterminés par le maillage des clous comme le montre la Figure 10.

13. Conclusions

La solution de soutènement hybride étudiée dans cet article est une adaptation envisageable dans certains contextes particuliers et très contraignants de montagne où les parois clouées habituellement réalisées ne sont pas justifiables.

La stabilité de la solution Talustaine est garantie en grande partie par les micropieux qui sont liaisonnés en tête. La longueur, l'inclinaison et l'entraxe des différents micropieux ont une influence directe sur la stabilité de l'ouvrage.

Les clous ont pour leur part un impact plus mesuré sur le coefficient de sécurité. Le maillage des clous a cependant une influence directe et notable sur les déplacements. Il est donc possible d'adapter le maillage des clous en fonction des déformations admissibles des ouvrages à l'arrière de la paroi.

Cette adaptation peut aussi être une variante envisageable à certaines parois butonnées qui sont très contraignantes du point de vue du phasage et des interactions avec les travaux de terrassement et de gros-œuvre. Ces contraintes de phasage peuvent impliquer des délais parfois non acceptables pour les projets en station à cause de impératifs de planning liés à la saisonnalité des travaux.

14. Références bibliographiques

- BISHOP J., JAMESON R., DE BERNADI B. (2009). *Support of an excavation face with micropiles*.
- CLOUTERRE (s. d.). *Recommandations CLOUTERRE pour la conception, le calcul, l'exécution et le contrôle des soutènements réalisés par clouage des sols*. Projet National CLOUTERRE.
- DE SAUVAGE J. G. (2018). *Étude du comportement des murs de soutènement par clouage des sols en place : Application au dimensionnement du parement* [Doctoral dissertation]. Université de Lyon.
- FAU D. (1987). *Le clouage des sols. Application au soutènement de fouille. Étude expérimentale et dimensionnement* [Doctoral dissertation]. Ecole Nationale des Ponts et Chaussées.
- JANES M. (2014). *Micropile Wall Supporting a Complex Environmental Excavation*.
- SIMON B. (2008, octobre). *Yield design applied to earth retaining structures*. Zemin Mekanigi ve Temel Muhendisligi. Onikinci Ulusal Kongresi, Selcuk Universitesi, Konya.
- SUN S-W., ZHU B-Z., MA H-M. (2009). Model tests on anti-sliding mechanism of micropile groups and anti-sliding piles. *Chinese journal of Geotechnical Engineering*, 1564-1570.
- SUN S-W., ZHU B-Z., & WANG J-C. (2013). Design method for stabilization of earth slopes with micropiles. *Soils and Foundations*, 53(4), 487-497.
- VOLCKE J-P., VALDEYRON G. (2020). *NF P 94-270 : Calculs géotechnique – Ouvrages de soutènement – Remblais renforcés et massifs en sol cloué*. AFNOR.
- YANG T., MEN Y., RUTHEFORD C-J., ZHANG Z. (2021). Static and Dynamic Response of Micropiles Used for Reinforcing Slopes. *Applied Sciences*, 11(14), 6341.
- YUENAN J., RUNZE C., SUOLA S., CHENGCHENG X. (2022). The Behavior and Optimization Analysis of Double-row Piles in Different Forms. *Jordan Journal of Civil Engineering*, 16(3).