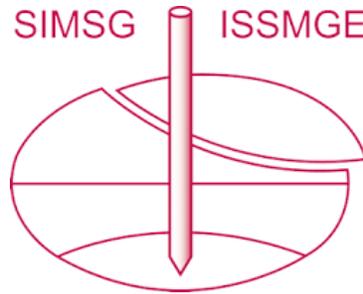


INTERNATIONAL SOCIETY FOR SOIL MECHANICS AND GEOTECHNICAL ENGINEERING



This paper was downloaded from the Online Library of the International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE). The library is available here:

<https://www.issmge.org/publications/online-library>

This is an open-access database that archives thousands of papers published under the Auspices of the ISSMGE and maintained by the Innovation and Development Committee of ISSMGE.



MODELISATION DE L'INFLUENCE DU GEL SUR UN MUR EN SOL CLOUE SIMULATION OF THE EFFECTS OF FROST ON SOIL NAILED WALLS

P. Unterreiner¹ R. Frank¹ F. Schlosser²

¹CERMES-ENPC/LCPC, Noisy-le-Grand Cedex, France

²TERRASOL, Montreuil, France

RESUME

L'influence mécanique du gel sur un mur ancré par tirants et sur un mur en sol cloué est modélisée et appliquée aux murs de La Clusaz. L'évolution de la profondeur de gel est modélisée avec la formule de Stefan. Les gonflements sont calculés avec la théorie du potentiel de ségrégation qui permet de prendre en compte la pression de confinement du parement. Connaissant le déplacement imposé par le gel au sol, le nouvel état d'équilibre de l'inclusion (tirant ou clou) est résolu en tenant compte de son interaction avec le sol gelé, le sol non gelé et le parement. Les simulations sur la paroi berlinoise ancrée et le mur en sol cloué de La Clusaz donnent de bons résultats compte tenu des incertitudes sur les paramètres et de la simplicité du modèle.

INTRODUCTION

Depuis la construction du premier mur en sol cloué à Versailles en 1971/1972, le clouage des sols s'est développé pour de multiples applications, dont les murs de soutènement en excavation. En France, un effort important de recherche sur ce sujet a été entrepris entre 1986 et 1991 dans le cadre du Projet National CLOUTERRE dont l'ensemble des résultats fut synthétisé sous la forme d'un document intitulé "Recommandations CLOUTERRE 1991", qui a été traduit en anglais (Schlosser et al., 1992). De plus en plus d'ouvrages en sol cloué sont construits dans des régions, comme les régions montagneuses d'Europe, où la saison hivernale impose des conditions sévères. Cependant, peu d'exemples de murs en sol cloué soumis au gel ont été publiés [Guilloux et al. (1983), Juran et Elias (1987), Vengeon (1989)]. Dans le cas d'un sol gélif, le gel de l'eau en place s'accompagne de la formation de lentilles de glace par suite de la migration d'eau du sol non gelé vers le front de gel. Lorsque le sol est libre, c'est à dire soumis à une pression extérieure nulle, ce phénomène se traduit par des gonflements du sol de plusieurs pour-cents. Quand le sol est confiné par un mur de soutènement, le gonflement est partiellement empêché; il en résulte alors des surpressions sur le parement et des surtensions dans les ancrages actifs (tirants) aussi bien que passifs (clous). L'influence de ces gonflements sur la structure diffère notablement entre une paroi ancrée, où les tirants n'interagissent avec le sol qu'à travers le parement, et un mur en sol cloué où les clous interagissent de plus avec le sol sur toute leur longueur. A cet égard, l'exemple des murs de La Clusaz, publié par Guilloux et al. (1983), est très intéressant. Durant l'hiver rigoureux 1980-1981, une paroi berlinoise ancrée et un mur en sol cloué construits pour une même fouille à La Clusaz, station de ski Alpine, furent soumis au gel. Le parement de la berlinoise se déplaça d'environ 4 cm, générant dans les tirants des augmentations de tension de l'ordre de 40%. Le sol dans le mur en sol cloué, par contre, subit des gonflements plus faibles, de l'ordre de 1 à 2 cm, mais avec des tractions qui furent multipliées par dix sur certains clous près du parement. Les têtes des clous poinçonnèrent par endroits la paroi sur une profondeur de 1 cm environ. Pour prévenir ce type de problèmes, les Recommandations CLOUTERRE 1991, issues du premier Projet National CLOUTERRE, préconisent d'isoler le sol gélif en doublant le parement par un isolant. Dans le cadre du Projet National CLOUTERRE II, lancé dans le prolongement du premier, l'influence mécanique du gel sur un mur en sol cloué a été étudiée. L'objet de cet article est de présenter la modélisation développée pour les parois ancrées et les murs en sol cloué et qui fut appliquée aux murs de La Clusaz.

MODELISATION

Les phénomènes qui interviennent dans un ouvrage en terre soumis au gel sont de trois types : thermique, hydrique et mécanique. Les deux premiers aspects ont été étudiés notamment par Vengeon (1989) pour des murs de soutènement de géométries complexes. Le troisième aspect est plus particulièrement étudié ici, en modélisant l'influence mécanique du gel sur une couche de sol, contenue par un parement et ancrée par un lit de tirants ou renforcée par un lit de clous (géométrie simplifiée unidimensionnelle). Les problèmes thermiques et hydriques sont résolus dans un premier temps en calculant : la profondeur de gel, le profil de température et le champ de déplacements imposé par les gonflements. Dans un deuxième temps, on détermine le nouvel état d'équilibre de l'inclusion étudiée, tirant ou clou, connaissant le déplacement du sol qui est imposé par les gonflements et les lois d'interaction entre le sol, le parement et l'inclusion. Les phénomènes mis en jeu étant non linéaires, le problème est résolu incrémentalement.

Profondeur de Gel et Profil de Température

Il a été montré par de nombreux auteurs, dont Stefan (1890), Berggren (1943) et Portnov (1962), que l'évolution de la profondeur de gel X en fonction du temps t dans une colonne de sol isolée latéralement pouvait être décrite par une parabole d'équation $X(t) = \alpha t^{1/2}$, pour une très large gamme de conditions thermiques initiales et aux limites du sol. Le coefficient α dépend, dans le cas présent, des propriétés thermiques du sol gelé, du sol non gelé, du parement, de la température initiale du sol θ_0 et de la température extérieure appliquée θ_s . Le profil de température dans l'ouvrage est linéaire par zones de matériaux, gelés ou non gelés. Le rapport des gradients de température entre deux zones est égal au rapport des coefficients de conductivité thermique respectifs des zones.

Gonflement du Sol sous l'Action du Gel

Le gonflement total h_t d'un sol se décompose en deux termes : un gonflement h_i , relativement faible, dû à l'augmentation de volume (9%) de l'eau interstitielle initiale lors du gel, et un gonflement h_s , relativement important, dû à l'apport et à l'augmentation du volume de l'eau aspirée vers le front de gel et formant les lentilles.

Pour une tranche de sol d'épaisseur Δz , le premier terme vaut au maximum :

$$\Delta h_i = 9 w \Delta z / [100 (w + (100 \gamma_w / \gamma_s))] \quad (1)$$

où w est la teneur en eau en pour-cent, γ_w le poids volumique de l'eau et γ_s le poids spécifique du sol. Le calcul du gonflement, dû à la formation des lentilles de glace, peut être fait avec la théorie du potentiel de ségrégation développée par Konrad et Morgenstern (1982), qui permet de tenir compte de l'influence de la pression extérieure P_{ext} sur les gonflements. Le potentiel de ségrégation, noté SP, est défini comme le rapport entre la vitesse, notée v_a , de l'eau aspirée vers le front de gel et le gradient de température dans la zone gelée, noté $grad\theta$. Le potentiel de ségrégation peut être écrit sous la forme suivante : $SP = SP_0 \exp(-b P_{ext})$ qui donne une borne supérieure des gonflements. Pendant l'intervalle de temps Δt , le gonflement de ségrégation Δh_s s'écrit sous la forme :

$$\Delta h_s = 1,09 SP grad\theta \Delta t \quad (2)$$

Le gonflement total Δh_t s'obtient en additionnant les deux termes de gonflement Δh_i et Δh_s .

Champ de Déplacement du Sol imposé par les Gonflements

Pendant un intervalle de temps Δt , le front de gel se déplace de ΔX . C'est dans la zone comprise entre $X(t)$ et $X(t) + \Delta X$ que l'eau gèle et que les lentilles de glace se forment essentiellement. Si le sol gelé peut être considéré comme très rigide, il faut par contre, suivant les cas, tenir compte d'une compression oedométrique du sol non gelé. Le champ de déplacement, noté ΔS_{sol} , imposé au sol par le gel, pendant l'intervalle de temps Δt , se décompose en trois zones : une zone comprenant le parement et le sol gelé avant t , qui se déplace vers l'extérieur comme un bloc rigide, une zone intermédiaire d'épaisseur ΔX , qui gonfle de Δh_t , et la zone de sol non gelé qui subit une compression oedométrique, notée Δw_u . Le déplacement absolu du parement Δw_f se calcule en retranchant au gonflement Δh_t le tassement du sol non gelé Δw_u .

Equilibre d'une Colonne de Sol Ancrée par un Lit de Tirants

On considère ici l'équilibre d'une colonne de sol de longueur L_s , ancrée par un lit de tirants, qui n'interagissent pas avec le sol sur toute leur longueur dite libre. Les tirants sont caractérisés par les paramètres suivants : longueur libre L_l , inclinaison β par rapport à l'horizontale, espacements horizontal S_h et vertical S_v , section d'acier S_a , module de l'acier E_a . La longueur L_s sera prise égale à $L_l \cos\beta$. Le tirant exerce, via le parement, une pression extérieure P_{ext} égale à $T \cos\beta / S_v S_h$ sur le sol et notamment sur le front de gel. Connaissant cette pression, il est possible de calculer pendant l'intervalle de temps Δt , les incréments de gonflement Δh_t , de déplacement du parement Δw_f et, à partir de ceux-ci, l'augmentation de traction ΔT dans le tirant :

$$\Delta T = E_a S_a \Delta w_f / L_l \cos\beta \quad (3)$$

D'autre part, le tassement Δw_u est relié à l'augmentation de traction ΔT , ce qui permet d'obtenir la relation explicite suivante entre l'augmentation de traction et le gonflement :

$$-\Delta T = \Delta h_t / [(L_l \cos\beta / E_a S_a) + (L_s \cos\beta / E_{oedo} S_v S_h)] \quad (4)$$

L'évolution de la traction est obtenue, connaissant la traction initiale, en résolvant le problème incrémentalement.

Equilibre d'un Lit de Clous renforçant une Colonne de Sol

On considère l'équilibre d'un lit de clous de longueur L_c , diamètre D_c , interagissant sur toute leur longueur avec une colonne de sol de longueur L_s prise égale à L_c . L'état initial de traction dans le clou est défini par la distribution $T_0(z)$. La contrainte de cisaillement, notée τ , est positive si elle s'oppose au déplacement de l'inclusion par rapport au sol.

Pendant un intervalle de temps Δt , le sol est soumis au déplacement imposé par le gel, noté ΔS_{sol} , qui engendre dans le clou un nouvel état d'équilibre caractérisé par les variations de traction $\Delta T(z)$ et de cisaillement $\Delta \tau(z)$ reliées entre elles par l'équation d'équilibre incrémentale :

$$d\Delta T(z) / dz + \pi D_c \Delta \tau(z) = 0 \quad (5)$$

L'augmentation de traction $\Delta T(z)$ est reliée à la déformation du clou $d\Delta S_a(z)/dz$ par la loi de comportement, supposé élastique avec un module E_c :

$$\Delta T(z) = -E_c (\pi D_c^2 / 4) d\Delta S_a(z)/dz \quad (6)$$

La variation de contrainte de cisaillement $\Delta \tau(z)$ est reliée au déplacement relatif sol-clou $\Delta S_r(z)$, égal à $\Delta S_a(z) - \Delta S_{sol}(z)$, par la fonction de transfert de charge qui définit le comportement de l'interaction sol-clou. En combinant les trois équations précédentes, on obtient l'équation d'équilibre en ΔS_a :

$$E_c (\pi D_c^2 / 4) d^2(\Delta S_a)/dz^2 - \pi D_c \Delta \tau(\Delta S_a - \Delta S_{sol}) = 0 \quad (7)$$

Dans le cas où le sol est non gelé, le comportement de l'interaction peut être décrit par une loi de type Frank et Zhao (1982). Dans le cas où le sol est gelé, le comportement du sol est caractérisé par une forte dépendance par rapport au temps. Des trois types de fluage : primaire, secondaire et tertiaire seuls les deux premiers sont modélisés. Le point de séparation entre les fluages secondaire et tertiaire est défini comme le seuil de rupture à partir duquel l'inclusion glisse par rapport au sol à cisaillement constant. L'approche simplifiée de Hult (1966), consistant à linéariser les courbes de fluage, a été retenue. Le déplacement relatif sol-clou S est décomposé en trois termes : un déplacement pseudo-instantané réversible $S^{(ie)}$, un déplacement pseudo-instantané irréversible $S^{(ip)}$ et un déplacement différé $S^{(c)}$. Dans le cas d'un mur de soutènement, le sol est confiné par le parement et est, par conséquence, soumis localement à une décharge due à la relaxation. Il convient donc de séparer, pour le déplacement pseudo-instantané, la partie réversible de la partie irréversible. Dans la fonction de transfert de charge, le terme $S^{(ie)}$ a été dérivé à partir de la méthode développée par Frank (1982) pour un milieu élastique linéaire. Les déplacements pseudo-instantané irréversible $S^{(ip)}$ et différé $S^{(c)}$ ont été dérivés à partir de la loi de comportement du sol suivant la méthode proposée par Johnston et Ladanyi (1972). L'influence de la température entre 0°C et -5°C sur les coefficients τ_k et τ_c , qui n'est que de quelques pour-cents, a été négligée. La courbe de mobilisation du frottement dans le sol gelé s'écrit alors sous la forme :

$$S(t) = S^{(ie)} + S^{(ip)} + \sum_i \dot{S}^{(c)} \Delta t_i \quad (8)$$

$$S^{(ie)} = \tau / C \quad (9)$$

$$S^{(ip)} = S_k (\tau / \tau_k)^k \quad (10)$$

$$\dot{S}^{(c)} = \dot{S}_c (\tau / \tau_c)^n \quad (11)$$

La courbe de mobilisation du sol gelé est décrite par sept paramètres dont deux, S_k et \dot{S}_c , qui sont introduits pour normaliser les lois et sont donc choisis arbitrairement. Les cinq autres paramètres sont déterminés à partir des essais d'arrachement par paliers de fluage. Le problème est résolu numériquement en discrétisant le sol et les clous en N éléments finis. Sur chaque élément, la solution exacte est écrite en fonction des deux constantes d'intégration de l'équation d'équilibre. Les $2N$ constantes sont ensuite déterminées de manière à satisfaire la continuité du déplacement et de l'effort de traction entre deux éléments ainsi que les conditions aux limites. Un programme spécifique, appelé INGEL (Inclusion soumise au GEL), a été développé à partir du logiciel PIVER-LCPC développé par Frank et Romagny (1990).

APPLICATION AUX MURS DE LA CLUSAZ

Une présentation des observations et mesures effectuées sur les deux types de mur du site de La Clusaz a été faite par Guilloux et al. (1983) (Figure 1).

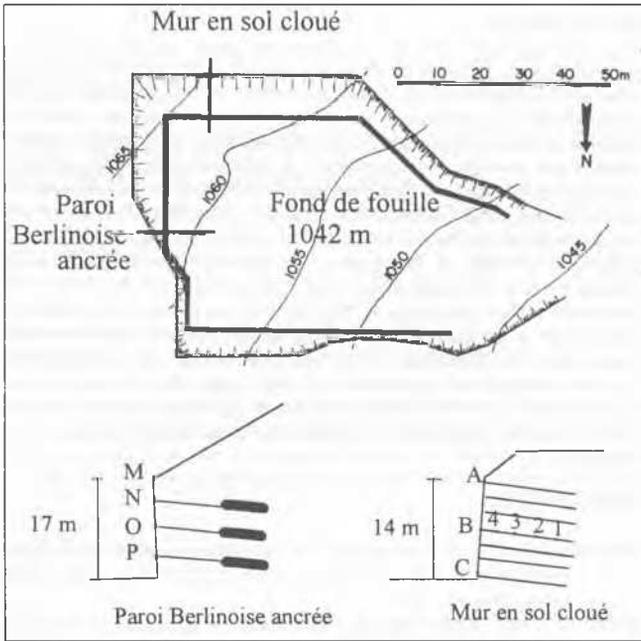


Figure 1 : Vue en plan de l'excavation et sections des murs de La Clusaz

Pour les simulations numériques, les paramètres thermiques qui n'avaient pas été mesurés, ont été calculés à partir des mesures de températures réalisées à la fin de l'hiver (Unterreiner et al., 1993). Après 70 jours de gel, le sol était gelé sur une profondeur de 38 cm derrière les 15 cm de béton du parement du mur en sol cloué et sur 22 cm derrière le parement de la berlinoise de 20 cm d'épaisseur, ce qui permet de calculer le coefficient α de pénétration du gel. De même, connaissant la température derrière le parement à la fin de l'hiver, il est possible de calculer la température extérieure moyenne, supposée constante, ainsi que le coefficient de conductivité du sol gelé. Ceci permet de modéliser, en fonction du temps, le profil de température derrière le parement de la berlinoise (Figure 2).

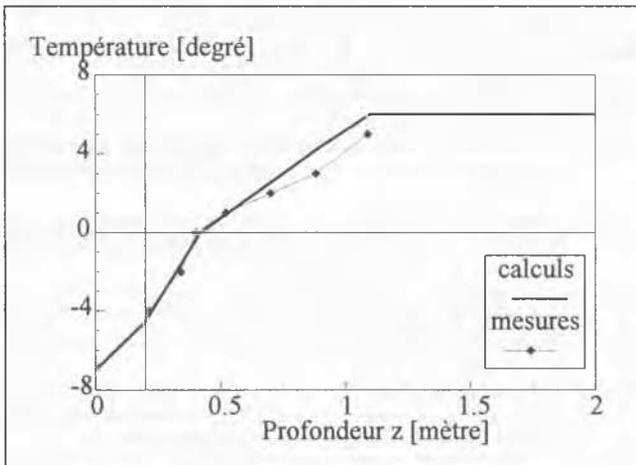
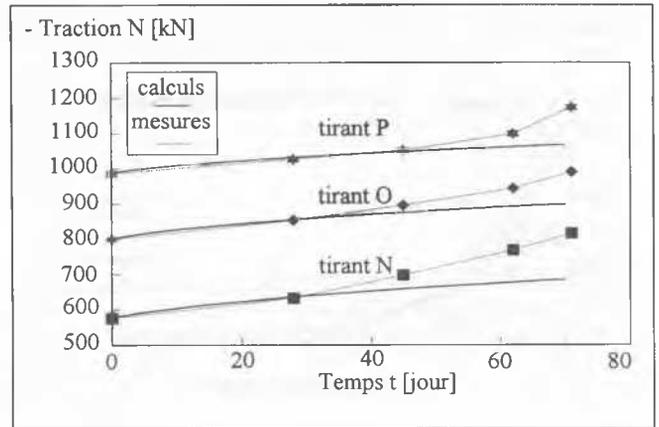


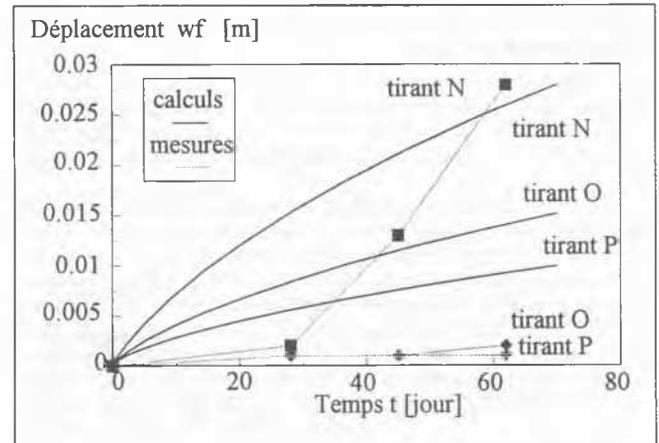
Figure 2 : Profil de température dans la berlinoise à t = 70 jours

Les paramètres de gonflement se réduisent, dans le cas de la théorie du potentiel de ségrégation, aux deux coefficients SP_0 et b . Le premier coefficient a été estimé à environ $0,0001 \text{ m}^2/\text{jour}/^\circ\text{C}$ à partir des données existant dans la littérature pour des sols similaires. Le coefficient b a été ensuite choisi de manière à caler le calcul de la traction du tirant N sur les mesures. Tous les autres paramètres ont été déterminés à partir de la géométrie de l'ouvrage et des caractéristiques mécaniques connues des tirants.

Les simulations pour les autres tirants, réalisées ensuite sans autre calage, donnent des résultats qui sont assez bons pour les tractions mais semblent mauvais pour les déplacements (Figures 3a et 3b).



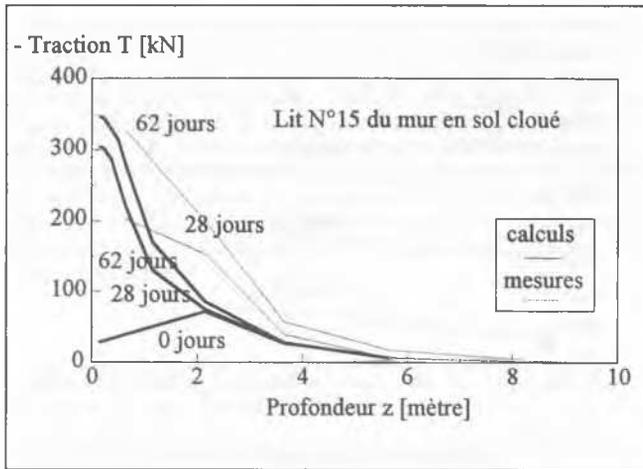
Figures 3a : Mesures et simulations, pour la paroi berlinoise ancrée, de l'évolution des tractions dans les tirants



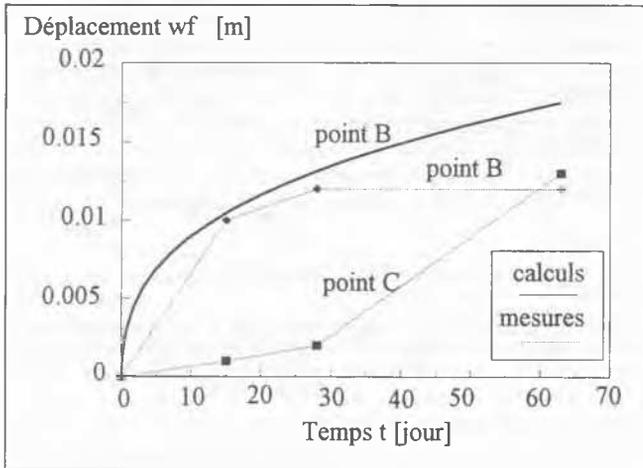
Figures 3b : Mesures et simulations, pour la paroi berlinoise ancrée, de l'évolution des déplacements du parement.

Il est à noter que les simulations ont été faites en supposant, par souci de simplification, une température extérieure égale à -7°C , constante dans le temps, alors qu'il a été observé en fin d'hiver une période très froide. Ceci explique la différence entre les tractions calculées et les tractions mesurées en fin d'hiver. Les valeurs de déplacements calculées pour N sont du même ordre de grandeur que les mesures. Pour les tirants O et P, les simulations donnent 1 à 1,5 cm alors que, d'après les mesures, ces tirants n'auraient pratiquement pas bougé. Cependant, les conditions difficiles de mesures rendent ces dernières assez contestables. Connaissant les paramètres thermiques et de gonflement du sol à partir des calculs sur les tirants, des simulations ont été réalisées pour les clous. Les paramètres définissant la courbe de mobilisation du sol non gelé ont été calculés à partir des résultats des essais pressiométriques et des essais d'arrachement (frottement latéral unitaire de 640 kPa). Les paramètres de fluage du sol gelé ont été pris égaux aux valeurs données par Johnston et Ladanyi (1972) pour le site de Gillam.

Les simulations ont été faites sur le lit de clous N°15, situé en partie médiane du mur en sol cloué et pour la période du 15-12-1980 au 15-02-1981 (Figures 4a et 4b).



Figures 4a : Mesures et simulations, pour le mur en sol cloué, de l'évolution des tractions dans les clous



Figures 4b : Mesures et simulations, pour le mur en sol cloué, de l'évolution des déplacements du parement.

Près du parement, le cisaillement est initialement positif. Quand le sol au contact avec le parement se met à geler, l'augmentation de traction engendrée dans le clou est telle que le sol en arrière du front de gel est en décharge et le cisaillement devient négatif. Quand le front de gel arrive en un point donné, l'augmentation de cisaillement, imposée par le déplacement du sol correspondant, est si importante que le sol à peine gelé est soumis à de très fortes contraintes. Comme il est confiné, une forte relaxation se produit quasi-instantanément, ce qui a pour effet de relâcher le cisaillement et donc de réduire la pente de la courbe $T(z)$, localement près du parement. Les tractions au parement sont donc plus faibles que celles qui pourraient être calculées en gardant pour le sol gelé la même courbe de mobilisation que le sol non gelé. Il est à noter que les simulations, si elles donnent des tractions au parement en assez bon accord avec les mesures, prédisent par contre, des tractions plus faibles en arrière du massif, ce qui peut s'expliquer par la valeur élevée du frottement latéral unitaire prise ainsi que par la géométrie unidimensionnelle du problème considéré. Les déplacements calculés pour les deux types de mur sont en assez bon accord entre eux. Les fortes tractions engendrées dans les clous, provoquent au front de gel, une forte pression P_{ext} qui tend à réduire les gonflements du sol dans le mur en sol cloué par rapport à ceux dans la berline ancrée.

CONCLUSIONS

La modélisation, présentée ci-dessus, fait intervenir des paramètres tels ceux décrivant la mobilisation du frottement entre le sol gelé et le clou ou ceux caractérisant les gonflements, qui ne sont pas le plus souvent étudiés ou mesurés. Il semble, au vu des premières simulations, qu'un calcul simplifié, gardant pour le sol gelé, la même courbe de mobilisation du frottement latéral que celle du sol non gelé, donne des valeurs conservatives pour les tractions tout en réduisant significativement le nombre de paramètres du problème. Par contre, la détermination des paramètres de gonflement, dans le cadre de la théorie du potentiel de ségrégation, est déterminante pour le calcul des surtensions dans les tirants et les clous. Les augmentations de traction dans les tirants sont au maximum de 50% dans le cas présent. Les surtensions induites par le gel dans les clous sont nettement plus importantes et restent concentrées près du parement. Il en résulte des surtensions au parement qui peuvent conduire à une plastification du clou en tête et/ou un poinçonnement du parement. Les clous et leur attache au parement doivent donc être dimensionnés en conséquence si la pénétration du gel dans l'ouvrage n'est pas empêchée.

REFERENCES

- Berggren, W. S., (1943). Prediction of temperature distribution in frozen soils; *Proc. Int. Symp. on Frost Action in Soils*, Vol. 1, pp. 42-53, Lulea, Sweden, 1977.
- Frank, R. (1982). Etudes théoriques de fondations profondes et d'essais en place par autoforage dans les LPC et résultats pratiques (1972-1983). *Rapport de recherche LPC N° 128*.
- Frank, R., Romagny, J. P. (1990). PIVER-LCPC, Programme de calcul d'un pieu soumis à une sollicitation verticale (*notice technique*).
- Frank, R., Zhao, S. R. (1982). Estimation par les paramètres pressiométriques de l'enfoncement sous charge axiale de pieux forés dans les sols fins; *Bull. de Liaison des Labo. des Ponts et Chaussées N° 119*.
- Guilloux, A., Notte, G., Gonin, H., (1983). Experiences on a retaining structure by nailing in moraine soils; *C. R. de la 8ème Conf. Europ. de Méc. des Sols et Trav. de Fond.*, Helsinki.
- Hult, J. A. H. (1966). *Creep in engineering structures*, Blaisdell Publ. Co., Waltham, Mass. 115 pp.
- Johnston, G. H., Ladanyi, B. (1972). Field tests of grouted rod anchors in permafrost. *Can. Geotech. J. N° 9*, pp. 176-194.
- Juran, I., Elias, V., (1987). Soil nailed retaining structures : analysis of case histories; *ASCE Geot. Spec. Publication N° 12*.
- Konrad, J. M., Morgenstern, N. R. (1982). Effects of applied pressure on freezing soils. *Can. Geotech. J.*, N° 19, pp. 494-505.
- Ladanyi, B. (1972). An engineering Theory of Creep of Frozen Soils, *Can. Geotech. J.*, N° 9, pp. 63-80.
- Portnov, I. G., (1962). Exact solution of freezing problem with arbitrary temperature variation on fixed boundary; *Soviet Physics Doklady*, Vol. 7, N° 3.
- Recommandations CLOUTERRE 1991 pour la conception, le calcul, l'exécution et le contrôle des soutènements réalisés par clouage des sols*, 271 p., Presses de l'ENPC Paris.
- Schlosser, F., Unterreiner, P., Plumelle, C. (1992). French Research Program CLOUTERRE on soil nailing. *Proc. of ASCEE Spec. Conf. on Grouting, Soil Improvement and Geosynthetics*. New Orleans, Vol.2, pp. 739-750.
- Soil Nailing Recommendations 1991 for designing, calculating, constructing and inspecting earth support systems using soil nailing from French National Project CLOUTERRE* (to be published in 1993).
- Stefan, J., (1890). *Über die Theorie der Eisbildung, insbesondere über die Eisbildung im Polarmeere*, vol. XCVIII, N°. IIa : *Sitzungsberichte der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Classe der Kaiserlichen Akademie der Wissenschaften*, Wien.
- Unterreiner, P., Frank, R., Schlosser, F. (1993) Modélisation de l'influence mécanique du gel sur les murs de La Clusaz; *Rapport interne CLOUTERRE II*, décembre.
- Vengeon, J. M., (1989). Murs cloués, méthodes de calcul et susceptibilité au gel; *rapport de T.F.E.*, sous la direction de M. Khizardjian, LR Lyon.