

FONDATEMENTS PROFONDES EN HAUTE MONTAGNE (SAVOIE) OUVRAGES DE REMONTEE MECANIQUE A 3 200m D'ALTITUDE

DEEP FOUNDATION IN HIGH FRENCH MOUNTAINS (SAVOIE) SKI LIFT AT 3 200m PEAK ALTITUDE

Patrick GIRARDI ¹, Maxime SOUDE ²

¹ NGE FONDATIONS – Directeur Scientifique et Technique

² NGE FONDATIONS – Chef de Projet Etudes

RESUME

Par leur capacité à être déployée dans des sites exigus et difficiles d'accès, les micropieux sont une technique de fondations profondes adaptée en domaine montagneux. Le présent sujet s'inscrit dans le cadre du projet de liaison par télécabine entre Orelles et la Cime Caron (VAL THORENS) où se trouvent le massif de la remontée mécanique, le bâtiment le recouvrant et 3 pylônes implantés en crête de falaise, tous fondés sur micropieux dans un contexte géotechnique complexe.

ABSTRACT

By their ability to be deployed in cramped and difficult-to-reach sites, foundation micropiles are a deep foundation technique adapted in mountain areas. The project of linking by cabin lift between Orelles and the Caron peak where the lift massif, the building covering it and 3 cliff-crested pylons, all based on foundation micro-piles in a complex geotechnical context.

1 Introduction

La construction en 1981 du Téléphérique actuel reliant la station de Val Thorens à la Cime Caron a mis en évidence la présence du permafrost sur 10 mètres d'épaisseur et le caractère déstructuré du massif rocheux.

La solution de fondations profondes par micropieux des nouveaux massifs s'est donc imposée afin de prendre en compte les conséquences de l'évolution du permafrost dans les années à venir du fait des changements climatiques attendus (Figure 1).

Toutefois, la réalisation de micropieux de diamètre de forage important (≥ 250 mm) et de longueur conséquente (≥ 14 mètres) à une altitude de 3 200 mètres impose des contraintes majeures en termes de capacité de matériel, de logistique d'approvisionnement et de résistance des équipes travaux due au déficit d'oxygène.

L'hétérogénéité des terrains sur les dix premiers mètres de la plateforme de travail et la présence de nombreuses fractures dues aux alternances de gel-dégel et/ou à la présence de glace en permanence nous imposent :

- De tenir compte dans le dimensionnement des phénomènes d'instabilités dus aux mouvements des sols (glissements, tassements, apparitions de vides, ...) pouvant entraîner une rupture par cisaillement ou par flambement des tubes ;
- D'adapter en permanence la technique de forage et de scellement en phase travaux pour garantir l'intégrité des micropieux sur toute leur hauteur ;

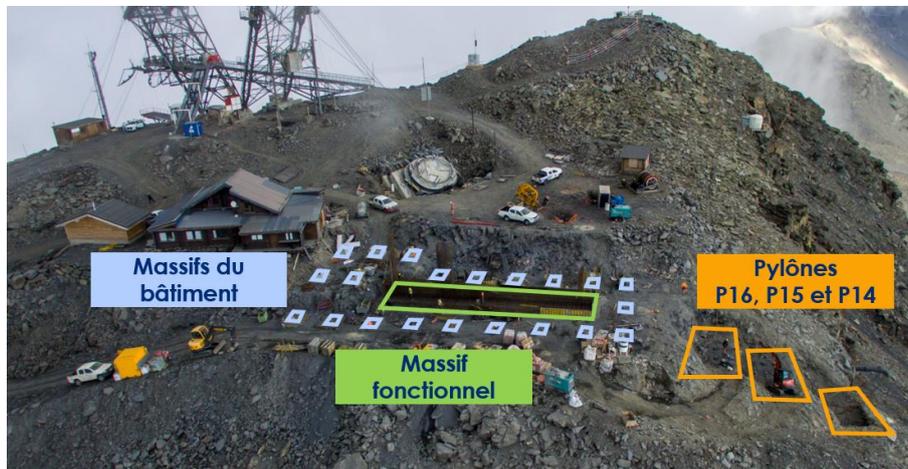


Figure 1 : Vue générale du site et des massifs de micropieux

2 Contexte géologique et incidence sur la conception

2.1 Contexte géologique

D'après la carte géologique du BRGM (1/50 000 n°775 « MODANE »), le projet est situé au sein des formations de grès et de schistes appartenant au Houiller Briançonnais. Des bancs massifs de grès émergent des masses glissées et alternent avec des bancs de grès fins et des schistes noirs.

Les observations de terrain et de la carte indiquent que ces formations ont subi une forte activité tectonique.

Le rapport du BRGM établi lors de la construction de l'actuel Téléphérique (1980-1982) attire l'attention sur l'état de fissuration et la dégradation du rocher, dans la partie sommitale du massif, rocher constitué d'un enchevêtrement de blocs de petite taille liés entre eux par une glace permanente.

La géologie de ce type d'environnement présente donc de nombreuses singularités telles que des réseaux de fracturation et des cavités entre blocs dont la plupart comportent un mélange sol-glace, voire, de la glace franche (Figure 2).

La zone destinée à accueillir les différents ouvrages étant assujettie au permafrost, les températures négatives presque toute l'année contribuent à expliquer la stabilité mécanique de ces formations géologiques.



Figure 2 : (à gauche) stratigraphie des sols en place – (à droite) glace franche observée dans les sondages carottés, extrait G2-PRO

Cependant les terrassements de la plateforme des futurs bâtiments réduisent l'épaisseur de matériaux de couverture des zones congelées et provoqueront, à terme, des mécanismes de fonte (déjà amorcés avec le réchauffement climatique...).

Notons de nos jours que compte tenu du réchauffement climatique, la température du sol à 1,5 mètre de profondeur alterne entre des valeurs positives et négatives, ce qui n'était pas le cas en 1980, car selon le rapport du BRGM le sol restait « congelé » en surface (température négative ou voisine de zéro) toute l'année...

Dans ces conditions, la justification des micropieux implique d'anticiper sur la prise en compte d'un modèle géotechnique hétérogène et évolutif, à l'origine de déplacements latéraux et de la mise en jeu de frottements négatifs.

En aval de l'ouvrage principal, la réalisation des massifs des pylônes implique des excavations dans des sols fracturés devant être confortés par clouage (Figure 3).



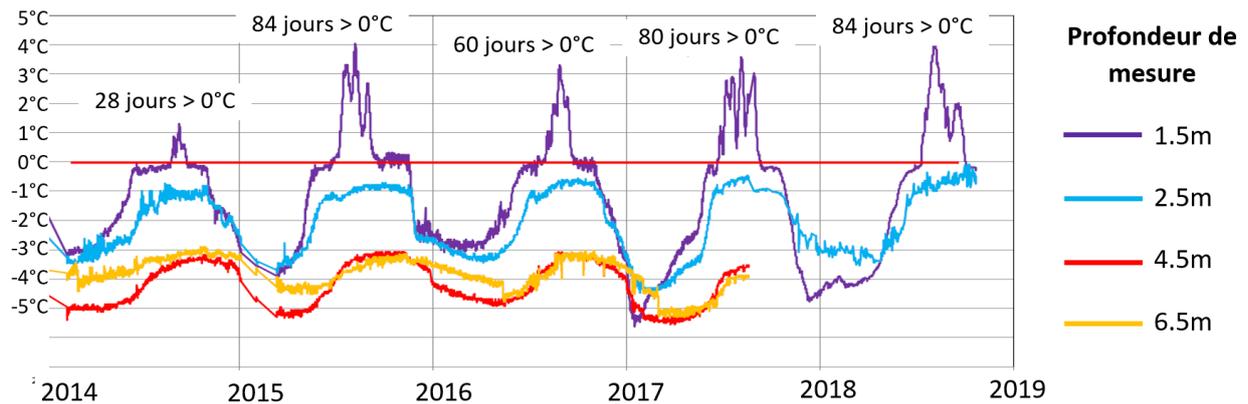
Figure 3 : Confortements aval des différents fronts d'excavation

2.2 Glace – Permafrost

La présence de glace est relevée **jusqu'à 9/10 m de profondeur** sous forme :

- **Soit de lentilles de glace vive** (en remplissage de fractures)
- **Soit sous forme d'un mélange de glace et de sols/blocailles**

Le suivi des sondes de températures installées en 2013 est illustré ci-après (Figure 4)



2.3 Incidence sur la conception – Cas du massif fonctionnel

La justification de la capacité portante(GEO) et de la résistance interne des micropieux (STR) est effectuée en prenant en compte les points suivants :

- Action de frottements négatifs sur une hauteur totale de 8 mètres liés à une possible fonte du permafrost en tête ;
- Déplacement latéral d'ensemble de 20mm des terrains de surface, sur une épaisseur de 4 mètres sous les massifs, et accompagné d'un affouillement sous les massifs variant de 0,5m à 1m ;
- Vérification au flambement des micropieux en considérant la formation d'un vide en tête (de 0,5m à 1m) et en minorant les caractéristiques mécaniques des sols traversés en fonction de la présence ou non de glace.

Nous présentons ci-après la maquette géotechnique (Figure 5) retenue pour le dimensionnement en portance des micropieux sous le massif de la gare d'arrivée et établie sur la base des résultats des essais de conformité réalisés avant démarrage des travaux :

MASSIF FONCTIONNEL G4 – MODELE GEOTECHNIQUE										
N°	Nature de sol	Profondeur de la base [m]	Paramètres statiques			Paramètres sismiques			α	q_{sk} [kPa]
			E_M^* [MPa]	p_r^* [MPa]	p_l^* [MPa]	E_M^* [MPa]	p_r^* [MPa]	p_l^* [MPa]		
1	Effets de surface ⁽¹⁾	-1.0	10,57	1,13	1,50	NC	NC	NC	0,25	-
2	Schistes altérés	-1.5 à -2.0	15,10	1,61	2,14	NC	NC	NC	0,33	-
3	Schistes compacts	-8.0 à -10.0	30,00 ⁽²⁾	3,12	3,12	NC	NC	NC	0,33	-
4	Schistes et présence de glace	Présence ponctuelle de -8.0 à -12.0	3.00	3,12	3,12	NC	NC	NC	0.33	-
5	Schistes compacts « profonds »	Au-delà de -10	30,00 ⁽²⁾	3,12	3,12	NC	NC	NC	0,33	400

(1) Pondération de E_M , p_r^* et p_l^* par 0,70 sur une épaisseur de $4\Phi_{\text{forage}}$

(2) Hypothèse sécuritaire par rapport à la valeur de 117,68 MPa (G2-PRO)

(3) Altimétries des couches recalées sur les forages des micropieux

Figure 5 : Modèle géotechnique du massif fonctionnel

3 Dimensionnement des micropieux du massif fonctionnel de la gare d'arrivée

Le massif béton armé de la gare est un radier en forme de T inversé (largeur de 5m et longueur de 23,5m pour 1,5m d'épaisseur) reposant sur 30 micropieux :

- 24 micropieux inclinés de 10° (effort de compression dans l'axe du pieu (Z) et effort transversal selon l'axe (Y) pour la stabilité transversale du massif)
- 6 micropieux inclinés à 45° (effort de traction issu de la tension des câbles selon l'axe longitudinal (X) de 1 848 kN à l'ELU)

Les micropieux sont constitués de tubes 177,8 ép 16mm renforcés en tête sur 4 mètres par des tubes 114,3 ép 10mm, scellés au coulis dans un forage de 250mm.

La réalisation d'essais de conformité et d'essais de contrôle selon les normes NF EN 14199 et NF EN 1997-1 est venue compléter les informations des fiches de forage, permettant la mise à jour en continu du modèle géotechnique de la zone, et permettant de dresser une cartographie plus fine du sous-sol.

3.1 Sollicitations verticales

Sur la base du torseur d'efforts transmis par le BET Structures, une modélisation avec le logiciel FOXTA (module GROUPIE) permet d'évaluer la redistribution des efforts horizontaux et verticaux en tête de chacun des 24 micropieux (Figure 6). Les micropieux d'ancrage inclinés à 45° ne sont pas considérés, impliquant un dimensionnement des micropieux sub-verticaux pour reprendre à eux seuls la totalité des efforts horizontaux.

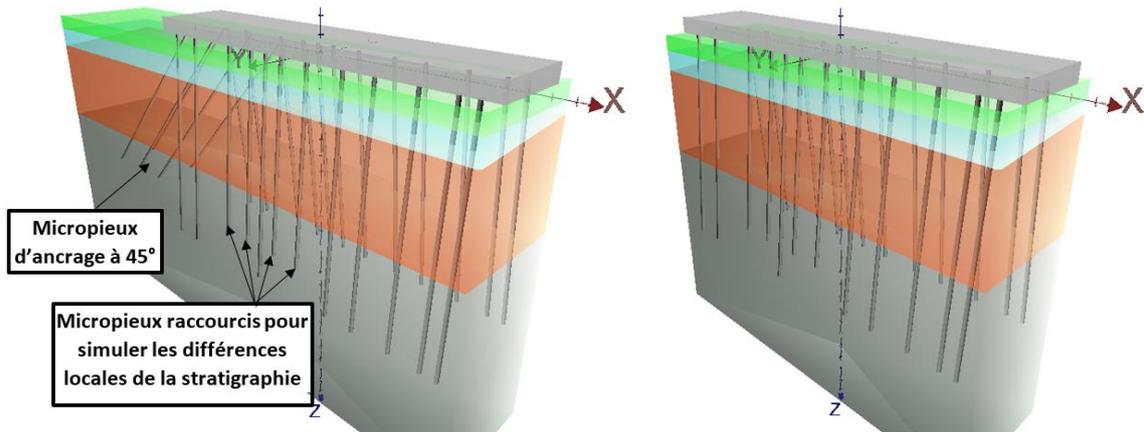


Figure 6 : modélisation des micropieux sous le logiciel FOXTA (Module GROUPIE) (à gauche) Modèle réel avec micropieux d'ancrages à 45° – (à droite) Modèle retenu

Ces efforts sont ensuite majorés en tenant compte :

- d'un incrément induit par la mise en traction des 6 micropieux inclinés à 45°
- du frottement négatif (Figure 7) évalué selon l'Annexe H de la NF P 94-262

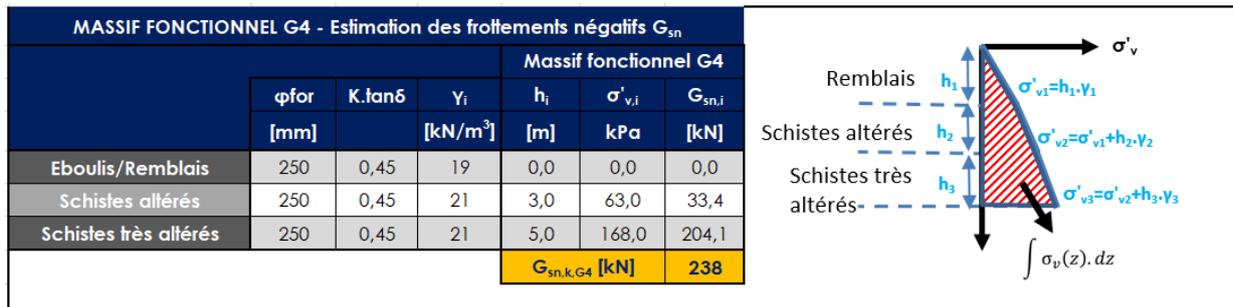


Figure 7 : Estimation des frottements négatifs

3.2 Sollicitations transversales

Les micropieux sont modélisés en poutre sur appuis élastiques (Figure 8) avec loi de comportement élasto-plastique (Logiciel FOXTA, module PIECOEF) sur la base :

- Des efforts horizontaux issus des modèles FOXTA (Module GROUPIE)
- D'un déplacement horizontal des matériaux sur l'épaisseur des schistes altérés couvrant le « substratum », soit au maximum sur 4 mètres d'épaisseur (d'après les sondages réalisés en début de chantier)
- D'une raideur de rappel horizontale en tête de micropieux induite par l'ancrage des micropieux inclinés à 45°

Le modèle géotechnique initial est recalé sur la base des premiers sondages :

- De 0m à -1m : perte de confinement liée à un affaissement des terrains sous le massif d'où des valeurs de E_M , P_f et P_l prises égales à 0 ;
- De -8m à -12m : présence de glace dans les schistes compacts modélisée par une diminution du confinement par 10, soit module E_M divisé par 10

Le déplacement horizontal correspondant à une déformée de type $g(z)$ définie manuellement est associé à un affouillement limité à 1.00m pour la détermination des cisaillements et des moments de flexion maximaux dans les tubes.

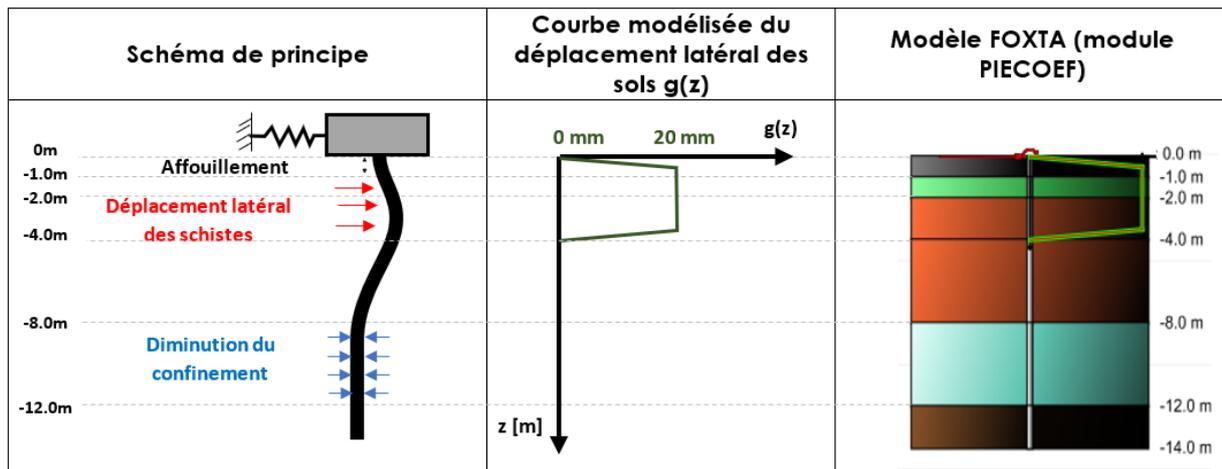


Figure 8 : Modélisation d'un micropieu sous comportement transversal

3.3 Justification de la résistance interne des micropieux

Pour tenir compte de la diversité des résultats des forages, des descentes de charges sous chaque massif, de l'inclinaison des micropieux par rapport à la verticale et des différents états limites de réponse du sol sous sollicitations transversales, de nombreuses modélisations furent nécessaires.

Ces calculs ont conduit à armer les micropieux par un double tube d'armature en tête et à des vérifications structurales d'instabilités de forme (flambement) selon les codes de calcul de l'EN 1993-1-1.

4 Phase travaux

L'absence d'une piste adaptée pour gagner l'altitude de 3200m de la Cime Caron ainsi que la période courte entre deux enneigements soulèvent non seulement des contraintes logistiques mais également un délai d'exécution réduit.

La création d'un accès depuis la base vie située à 2500 m d'altitude est indispensable pour amener l'ensemble du matériel nécessaire à cette opération, entre-autre : 3 foreuses MC15 de 16 tonnes paramétrées pour une combustion avec manque d'oxygène, 2 compresseurs de 30 000 litres, 3 postes d'injection complétés ponctuellement de bennes héliportées et divers containers ou citernes (d'eau chaude notamment).

En intégrant les problématiques d'intempéries, de grands vents et de neige, 3 mois de travaux auront conduit à la réalisation de 1 600 m de forage de type « rota Odex » et « marteau fond de trou ».

Les équipes regroupant 15 personnes accédaient au chantier situé à 3 175m d'altitude depuis la base vie par un chemin accidenté de 7 km soit $\frac{3}{4}$ d'heure de trajet.

5 Conclusion

L'altitude et la géologie du site (alternance de grès et de schistes, fracturés en profondeur et très altérés en surface avec présence de vides et de glaces) ont largement complexifié les travaux et rendu les tâches des compagnons difficiles.

Il a fallu adapter en permanence les techniques de forages, les dimensionnements des ouvrages et les approvisionnements aux particularités de ce chantier en haute altitude.

Les équipes ont dus également s'adapter aux conditions climatiques et à l'altitude.

La prise en compte de la fonte programmée du permafrost avec le réchauffement climatique est une nouvelle donnée qui devrait se généraliser dans les travaux de montagne et qui nous amène à réfléchir sur les moyens dont nous disposons pour ralentir ce phénomène qui semble inéluctable.

Nos équipes ont pu prendre conscience des effets du réchauffement de la terre et, en cela, ce chantier restera mémorable...

6 Références bibliographiques

NF EN 1990 et annexes : Base de calcul des structures

NF EN 1992 et annexes : Calculs des structures en béton

NF EN 1993 et annexes : Calculs des structures en acier

NF EN 1998 et annexes : Calculs des structures pour leur résistance au séisme

NF EN 1997 et annexes : Calculs géotechniques