

171

MITTEILUNGEN der GEOTECHNIK SCHWEIZ
PUBLICATION de la GÉOTECHNIQUE SUISSE
AVVISO di GEOTECNICA SVIZZERA

Herbsttagung vom 5. November 2015, Journée d'étude du 5 novembre 2015, Genève

CEVA Lot 7 – Tranchée couverte profonde en sols meubles

Alain Oulevey

CEVA Lot 7 – Tranchée couverte profonde en sols meubles

1 Introduction

Débutant à l'extrémité de la gare des Eaux-Vives au point kilométrique (pk) 70.75, le lot 7 de la liaison ferroviaire Cornavin – Eau-Vives – Annemasses (CEVA) s'étend sur plus de 4 kilomètres jusqu'à la frontière franco-suisse au pk 74.39. La nouvelle ligne ferroviaire, qui comprend une gare intermédiaire à Chêne-Bourg entre les pk 73.00 et 73.22, est souterraine sur l'ensemble du lot 7, à l'exception de son croisement avec le ruisseau de la Seymaz qu'elle enjambe furtivement avant de replonger sous le niveau du terrain naturel. Elle libérera ainsi en surface un espace de détente et de mobilité douce, la Voie verte.

Le projet prévoit la construction d'une tranchée couverte d'un gabarit intérieur libre d'environ 10 m x 7 m (l'arrgeur x hauteur) permettant d'assurer un trafic ferroviaire à doubles voies. Généralement implanté à une profondeur de l'ordre de 10 à 15 m par rapport au niveau du terrain naturel, le radier de la tranchée couverte s'enfonce à plus de 20 m de profondeur peu après la gare des Eaux-Vives. Ce tronçon singulier du lot 7, communément identifié comme « la tranchée profonde », fait l'objet de la présente publication.

2 Contexte géotechnique

Le profil géotechnique de la zone de la tranchée profonde est illustré à la Figure 1.

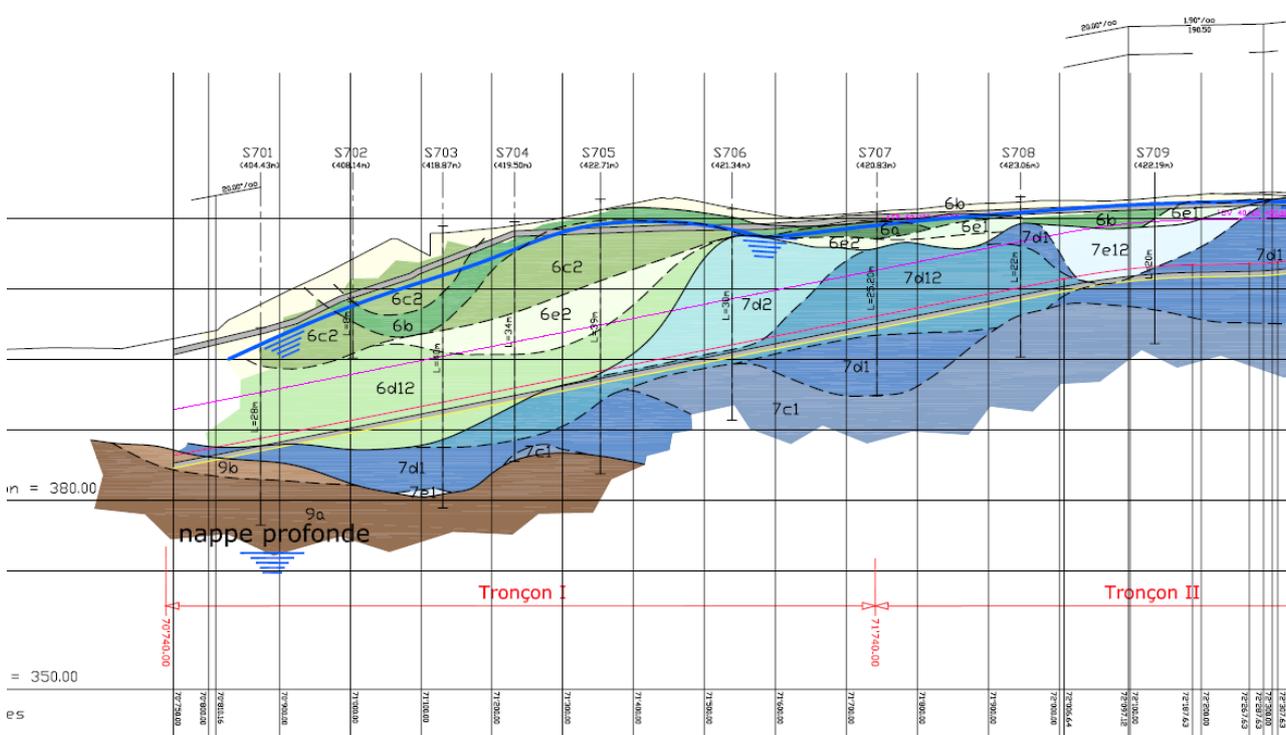


Figure 1 Profil géotechnique schématique dans la zone de la tranchée profonde (Tronçon I)

Sous les sols superficiels, la zone de la tranchée profonde se caractérise par la présence de dépôts liés au **retrait würmien (6)** sur une épaisseur importante, localement supérieure à 25 m. Depuis la surface vers la profondeur, ces dépôts comprennent tout d'abord des phases plutôt grossières, sableuses et limoneuses (6b – 6c), puis des phases plus fines, limono-argileuses et argileuses (6d – 6e). Les phases limono-sableuses sont dans l'ensemble saturées et fluentes. Leur compacité est très lâche à lâche et leurs indices de plasticité sont plus faibles que les moyennes dites "représentatives". Ces sols, relativement médiocres, sont présents sur une hauteur de 8 à 12 m environ. Ils ont, par le passé, causé de nombreux problèmes lors de la réalisation du tunnel de la Micheline. Les phases plus fines, limono-argileuses et argileuses, sont des terrains peu perméables de qualité médiocre à moyenne et de consistance molle. Leur épaisseur est d'environ 13 m.

Sous les formations de retrait würmien, la **moraine à cailloux et blocs alpins (7)** est généralement présente dans la zone de fiche de la paroi moulée. Ce sont les phases limono-argileuses semi-consolidées (7d12) et consolidées (7d1) de cette moraine würmienne qui forment le premier horizon résistant rencontré au droit de la tranchée couverte.

Signalons enfin que dans la zone proche de la gare des Eaux-Vives, la tranchée couverte intercepte l'**alluvion ancienne (9)**, soit des terrains principalement graveleux (9a) et très compacts, siège d'une nappe phréatique profonde qui n'est pas été atteinte par les sondages.

Du point de vue hydrogéologique [1], [2] et [3], la zone se caractérise par la présence

- d'une nappe supérieure relativement continue et proche de la surface dans les formations grossières du retrait würmien (6b et 6c). Plus bas, les formations limono-argileuses et argileuses du retrait würmien (6d ou 6e) sont également à considérer comme saturées. Les sols morainiques (7d) sous-jacents, de faible perméabilité, permettent par effet de nappe suspendue, l'existence de cette nappe supérieure.
- d'une nappe profonde dans l'alluvion ancienne. Les fiches n'atteignent pas cette nappe sur ce tronçon. A noter que cette nappe est libre et que la pression interstitielle est donc par définition nulle sur les premiers mètres de cette formation, garantissant la condition aux limites correspondante à l'interface avec la moraine à cailloux.

3 Projet

3.1 Caractéristiques principales

La coupe type de la tranchée profonde est illustrée à la Figure 2. Ses caractéristiques géométriques principales sont les suivantes :

- parois moulées épaisseur 1m, hauteur dégagée 11 à 21 m, fiche 5 à 7 m
- dalle de couverture d'épaisseur 0.80 m
- dans la zone la plus profonde, rang intermédiaire de butons de section 0.60 x 0.60 m
- dalle inférieure d'épaisseur 0.65 m.
- superstructure de radier comprend du haut vers le bas :
 - un radier flottant abritant l'infrastructure ferroviaire,
 - un radier définitif d'épaisseur 0.55 m reprenant à terme la poussée des terres,
 - un sous-radier bloquant d'épaisseur 0.30 m, soutènement provisoire posé à l'avancement des terrassements par étapes de longueur limitée à 5 m,
 - un sous-radier drainant 0.30 m d'épaisseur avec pipes de surpression, garantissant le rabattement permanent de la pression interstitielle sous le radier.
- collecteur eaux claires Ø 0.40 m avec chambres de visite tous les 100 m'
- puits de pompages (Ø 0.80 m) espacés de 10 m, se prolongeant entre 1 à 2.5 m sous le niveau de fiche des parois moulées. Une fois le fond de fouille atteint, ces puits provisoires sont remplis de boulets et connectés au sous-radier drainant.

3.2 Etapes de réalisation

Sur la tranchée profonde, la séquence de travaux mise en œuvre est la suivante :

1. Démolitions de surface, pré terrassement du terrain avec maintien éventuel ou déviation des services existants
2. Exécution des parois moulées et de puits de décharge
3. Exécution de la dalle supérieure
4. Terrassement en taupe avec mise en œuvre du pompage à l'avancement
5. Exécution des butons intermédiaires (section 0.6 m x 0.6 m tous les 3.0 m)
6. Poursuite du terrassement en taupe
7. Exécution de la dalle intermédiaire
8. Terrassement à 4.5 m au-dessus du fond de fouille
9. Terrassement journalier par étapes limitées de 5 m, avec exécution à l'avancement du collecteur EC, du sous-radier drainant et du sous-radier bloquant, y compris arrêt des pompes et remblayage des puits de rabattement avec gravier 16/32
10. Exécution du radier définitif
11. Remblayage et reconstruction du fini.

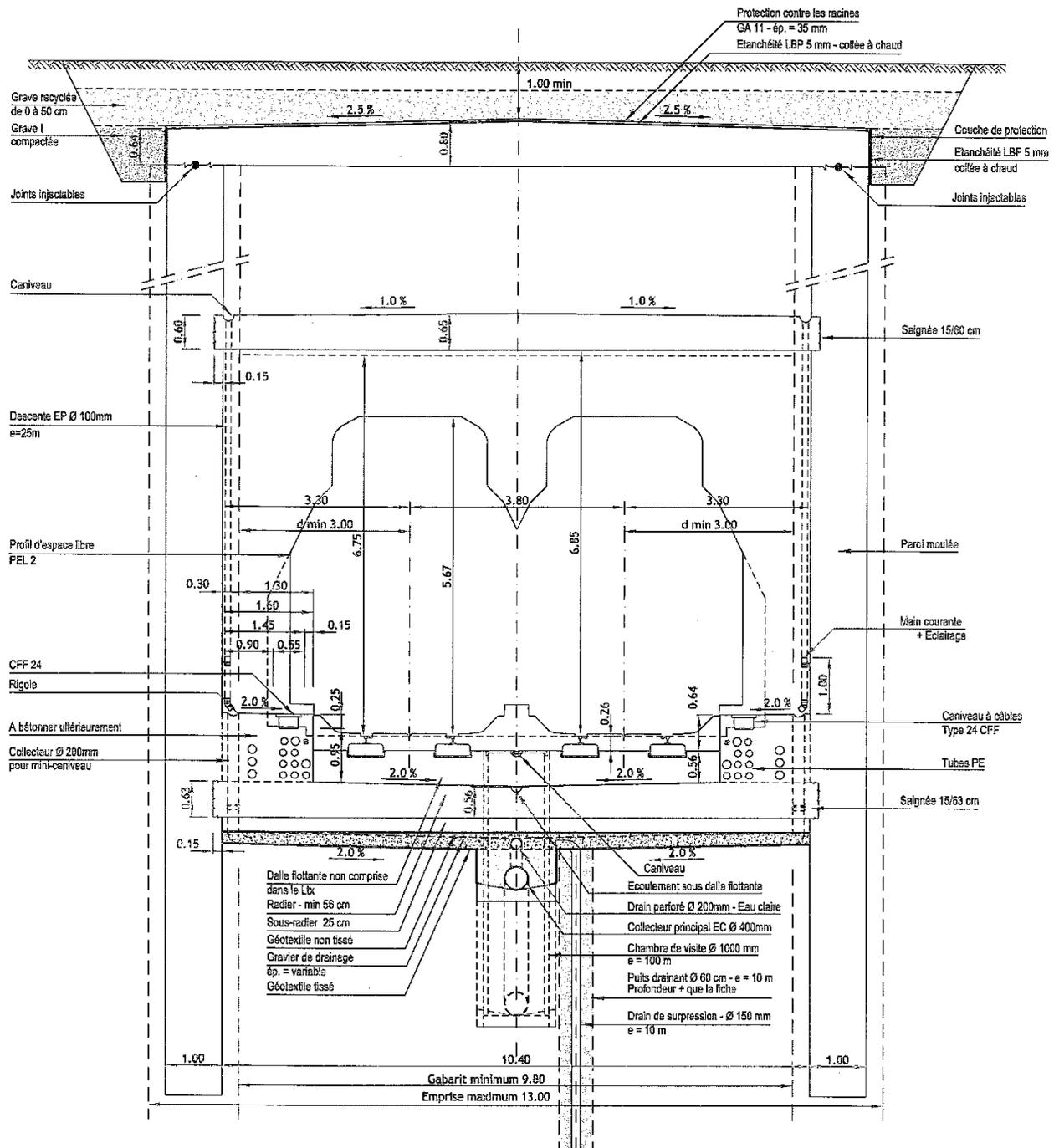


Figure 2 Profil transversal type de la tranchée couverte profonde

4 Modélisation de la tranchée couverte

4.1 Hypothèses de base

4.1.1 Modèle géotechnique

Le modèle stratigraphique décrit au chapitre 2 et retenu pour le dimensionnement de la tranchée profonde est illustré à la Figure 3, sur laquelle est également visible, en surface, l'ancienne tranchée couverte de la Micheline aujourd'hui démolie-

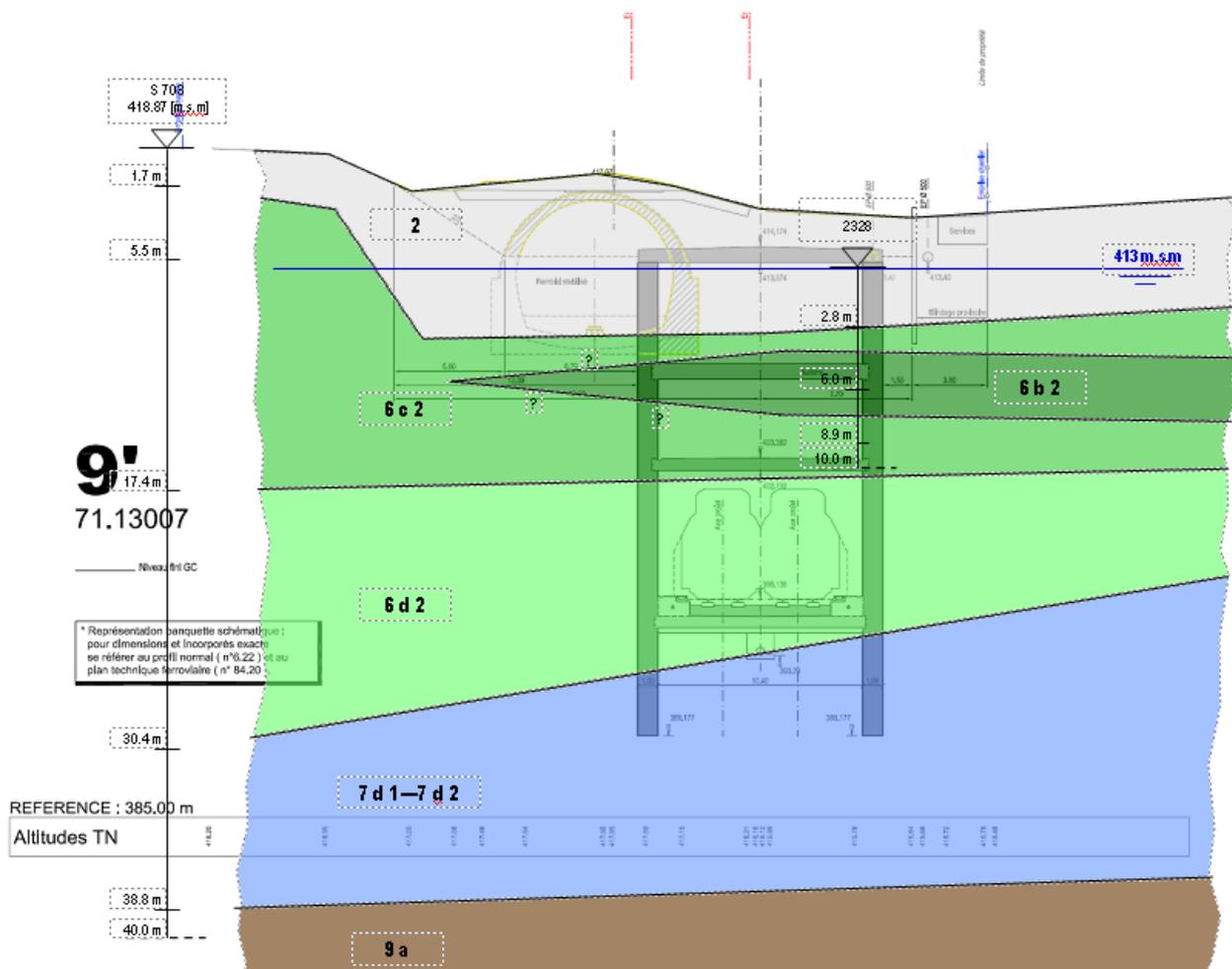


Figure 3 Modèle géotechnique schématique de la tranchée couverte profonde (pk 71.13)

Les principaux paramètres géomécaniques retenus pour ces différentes couches sont résumés au Tableau 1.

Type de sol	Poids volumique apparent γ [kN/m ²]	Angle de frott. effectif Φ' [°]	Cohésion effective c' [kN/m ²]	Cohésion non drainée c_u [kN/m ²]	Module d'élasticité E [kN/m ²]	Perméabilité K [m/s]
2	20.0	28-30	0-2	-	-	
6b	21.0	34	0-5	-	25	
6c2	20.0	28	9	30	15	
6d2	20.0	26	10	30	8	$5 \cdot 10^{-9}$
7d1	22.5	29	24	120	35	$3 \cdot 10^{-8}$
7d12	22.0	28	20	80	30	$7 \cdot 10^{-8}$
7d2	21.5	27	14	50	15	
9a	24.0	40	< 5	-	150	$6 \cdot 10^{-4}$

Tableau 1 Paramètres caractéristiques retenus pour les principaux types de sols (valeurs Xk)

4.1.2 Modèle hydrogéologique

Les hypothèses relatives au modèle hydrogéologique influencent de manière déterminante le dimensionnement de la paroi moulée, en particulier :

- le modèle de distribution des pressions interstitielles (modèle hydrostatique avec ou sans réduction de la pression au sein de la moraine et/ou sous l'effet du pompage),
- la variation à court terme des pressions interstitielles dans les sols fins suite à une modification rapide de l'état de contrainte du terrain. Notre expérience de ce type de stratigraphie à Genève montre en effet qu'à court terme, lors de l'excavation d'une fouille, les pressions interstitielles à l'amont des soutènements chutent instantanément de 20 à 40% par rapport à la pression hydrostatique sous l'effet de la décompression. A long terme, la pression de l'eau va ensuite tendre vers un équilibre correspondant au régime permanent.

Au final, les hypothèses principales suivantes ont été retenues :

- Radier drainant (pas de reprise des sous-pressions), soutènements étanches
- Poussées hydrostatiques contre les soutènements jusqu'au pied de l'écran à l'état initial, puis gradient hydraulique lié à l'excavation et à la réalisation des puits de décharge, ce qui conduit à des réductions des pressions interstitielles de l'ordre de 25 à 30 % dans la zone de la fiche.

4.2 Modèles de calcul

Différentes approches ont été adoptées pour le calcul de la paroi moulée de la tranchée profonde de manière à cerner au mieux son comportement durant les différentes phases d'excavation et à évaluer au mieux l'enveloppe de ses efforts internes et de ses déformations.

4.2.1 Approches par éléments finis

Le principal effort de modélisation a été réalisé en collaboration avec la société GeoMod ingénieurs-conseils, par la mise en œuvre de modèles aux éléments finis 2D et 3D (logiciel Z_Soil). Ces approches ont été utilisées pour le dimensionnement des structures, l'état-limite de service et les contrôles de stabilité. Couplées hydro-mécaniquement, elles prennent en compte :

- le comportement élasto-plastique avec écrouissage des sols (modèle Hardening Small Strain pour les lois constitutives),
- l'interaction sol-structure
- les étapes de réalisation.

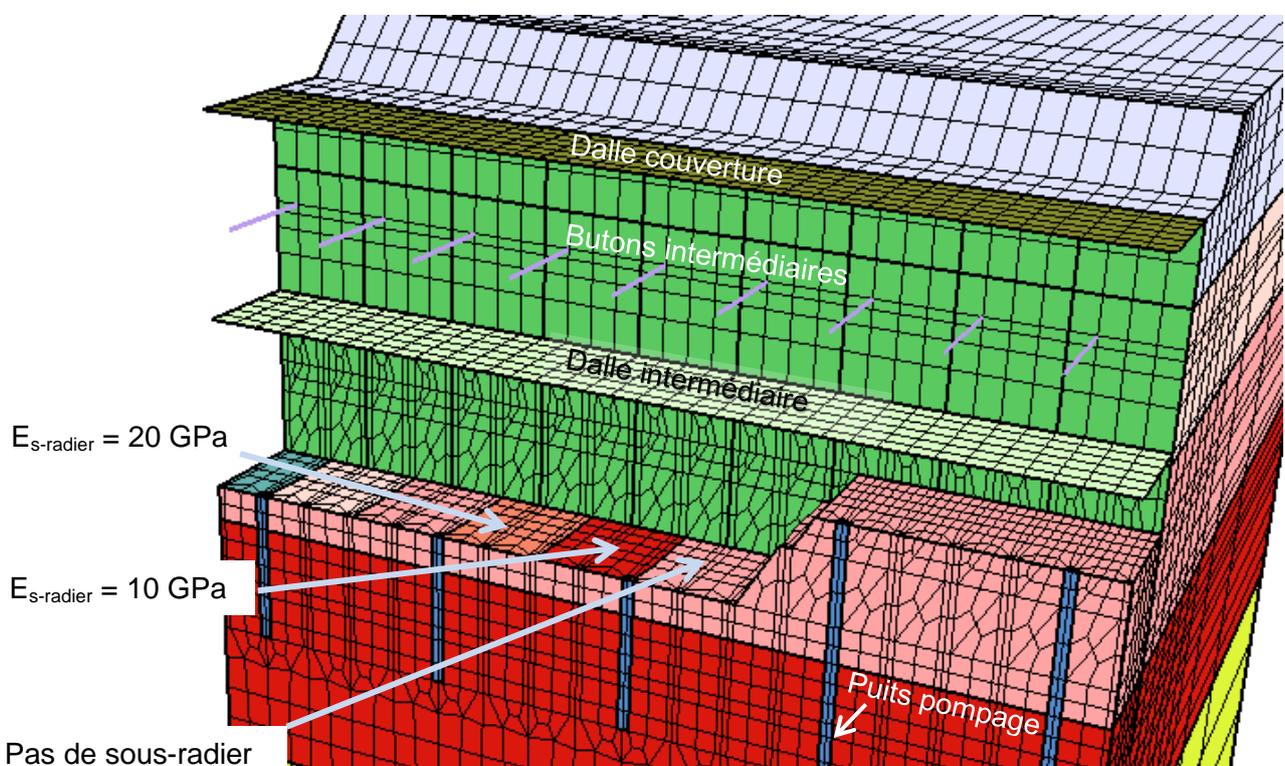


Figure 4 Modélisation 3D tranchée couverte – Dernière étape terrassement par passes de 5 m

Pour les calculs 2D, le taux de décompression des sols avant la pose du sous-radier bloquant a été admis à 75% sur la base d'une approche manuelle corroborée par la modélisation 3D de l'épavage réel des terrassements.

A l'exception d'un cas, les calculs par éléments finis ont été réalisés en stade de service, avec les paramètres X_k , sans facteur de charge. Les dimensionnements structurels ont ensuite été effectués sur la base des efforts issus des approches par éléments finis pondérés d'un facteur de charge global de $\gamma_R = 1.4$.

Un calcul par éléments finis a tout de même été effectué en stade de dimensionnement (X_d), en s'inspirant de la directive OFROU « Tunnels exécutés à ciel ouvert » du 24.6.2011, alors en consultation au moment des études.

4.2.2 Approches aux modules de réaction

Plus rapides et plus simples dans leur mise en œuvre, des approches aux modules de réaction 2D ont été entreprises à l'aide du logiciel RIDO pour le dimensionnement des structures et l'état-limite de service, notamment pour les sections de calcul intermédiaires. Les modèles utilisés permettent la prise en compte :

- des pressions interstitielles (calées sur la modélisation aux éléments finis),
- de lois comportementales élastiques parfaitement plastiques pour les sols.
- de l'interaction avec les éléments structuraux butant les parois (dalles, butons et radier)
- des étapes de réalisation, y compris la dernière phase de terrassements pour laquelle le phasage par étapes de longueurs limitées a été simulée de manière simplifiée

Tout comme pour les modélisations par éléments finis, les calculs ont été réalisés en stade de service, avec pondération des efforts obtenus par un facteur global $\gamma_R = 1.4$ pour les dimensionnements structurels.

4.2.3 Approches classiques

Finalement une approche à la « main » basée sur les formules de la littérature a été mise en œuvre avec des facteurs de charge selon les normes SIA260ss pour tous les problèmes de soulèvement et de rupture de fond de fouille, ainsi que pour des pointages au niveau des efforts agissant sur la paroi.

Par soucis d'exhaustivité, signalons enfin que les calculs de stabilité des talus provisoires de la dernière étape de terrassement ont été effectués par la méthode des tranches, à l'aide du logiciel 2D GEOSLOPE.

4.3 Situations de projet

Pas moins de 24 situations de risque principales, pour lesquelles plusieurs études paramétriques ont été étudiées, ont été prises en compte dans le cadre du dimensionnement de la paroi moulée :

- **Etat-limite ultime 1 (stabilité d'ensemble – soulèvement de la structure) :**
5 situations de risque prenant en compte les phases transitoires de la dernière étape de terrassements et le stade définitif, ainsi que différentes situations de risque accidentelles (panne des pompes, colmatage des puits, veine perméable en charge sous les puits)
- **Etat-limite ultime 2 (résistance ultime de la structure porteuse ou de l'un de ces éléments) :**
16 situations de risques transitoires, durables et accidentelles relatives aux différentes phases d'exécution de la tranchée couverte et à son stade d'exploitation. A noter que 9 de ces 16 situations de risques sont liées aux hypothèses relatives aux pressions interstitielles.
- **Etat-limite ultime 3 (résistance ultime du terrain) :**
3 situations de risque documentant la stabilité générale de l'ouvrage et des talus provisoires du terrassement

4.4 Principaux résultats des études

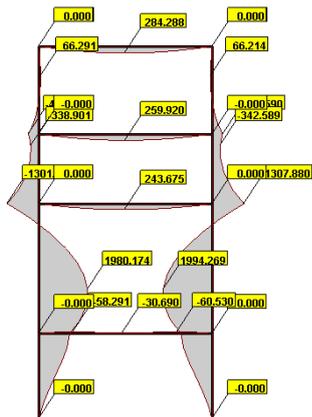
4.4.1 Stabilité du fond de fouille

La vérification à court terme de la stabilité du fond de fouille de l'étape en cours d'excavation est déterminante pour le dimensionnement. Pour cette situation de risque, le soulèvement du « bouchon » au niveau de la fiche a été effectué en admettant une répartition des pressions interstitielles à 70% du cas hydrostatique et les paramètres non drainés pour le frottement des sols.

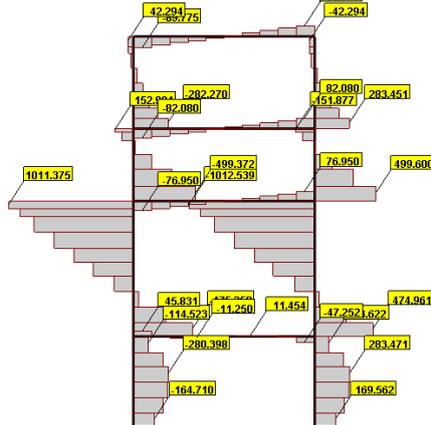
4.4.2 Poussées sur la tranchée couverte

Les résultats du cas de base du calcul des poussées sur la tranchée couverte lors de la dernière étape de terrassement une fois le sous-radier posé sont illustrés à la Figure 5

Moments de service [kNm/m']



Effort tranchant [kN/m']



Effort normal [kN/m']

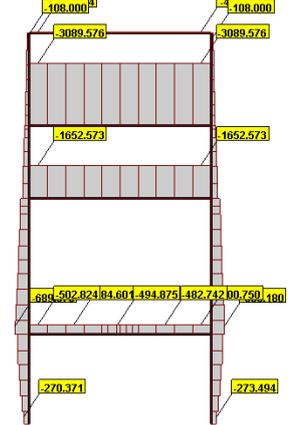


Figure 5 Effort de service sollicitant la tranchée couverte après pose du sous-radier bloquant

Ce cas de base a fait l'objet de plusieurs études paramétriques portant notamment sur le taux de déconfinement des sols au moment de la pose du sous-radier, la qualité et la perméabilité des sols de fiche ou encore les pressions interstitielles. Ces études ont mis en évidence différents éléments :

- La vitesse de mise en place du sous-radier influence fortement les résultats avec une diminution des efforts dans la paroi moulée et une augmentation nette des efforts dans le sous-radier bloquant
- Le modèle hydrogéologique retenu influence grandement les résultats des calculs (diminution de 30 à 40% des efforts et des déplacements selon les hypothèses retenues). Cela implique que les mesures constructives les plus efficaces pour limiter les efforts et les déplacements consistent à agir au niveau de l'eau souterraine.
- Le calcul en « Xd » qui s'inspire des facteurs partiels de la norme reste indicatif. A noter qu'avec ce calcul, le mécanisme de mouvements de la paroi moulée est modifié, ce qui induit une augmentation des efforts.
- Les calculs aux modules de réaction jouent avant tout un rôle de pointage et de vérification de l'approche EF. D'expérience, cette approche est généralement plutôt conservatrice pour de telles profondeurs, du fait de la non-redistribution par le terrain des poussées au droit des appuis. De plus, elle n'intègre que l'équilibre horizontal des efforts. Or, l'approche aux éléments finis met en évidence une forte réorientation des contraintes dans la zone de butée.
- Les calculs par éléments finis 3D, plus lourds, intègrent a priori mieux la réalité. Ils ont en particulier permis de valider les hypothèses pour les calculs 2D au niveau du taux de déconfinement, des pressions interstitielles et de l'effet des puits de pompage. Au niveau de la paroi moulée, les moments maximaux positifs (M+, moments en travée) sont proches de ceux obtenus en 2D. Pour ce qui est des moments maximaux négatifs au niveau de la dalle intermédiaire (M-, moments sur appuis), les efforts sont comparables quand le comportement du sous-radier est admis élastique comme en 2D. Par contre la prise en compte de la non-linéarité du béton du sous-radier et de sa plus faible résistance à la compression au jeune âge peut induire une augmentation de l'effort maximal M- par rapport au cas de base 2D (+ 20%).
- Pour l'approche par éléments finis, le cas court terme a été intégré sur la base d'un calcul 2D transitoire prenant en compte les temps de consolidation et les durées prévues pour les étapes de réalisation. Les efforts résultants sont moins importants que pour le calcul long terme au niveau de la paroi moulée, avec par contre une augmentation momentanée de l'ordre de 30% des efforts dans le sous-radier.

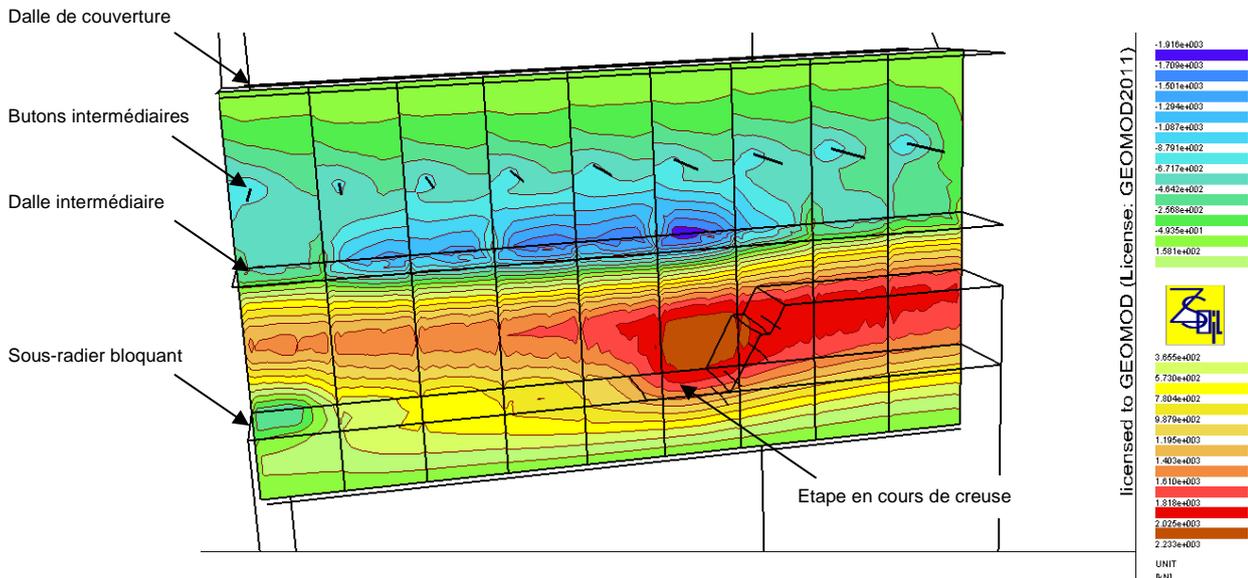


Figure 6 Moment de flexion paroi moulée avec sous-radier bloquant admis comme élastique

- Au niveau du sous-radier, la répartition des efforts n'est pas uniforme. Ainsi, avec l'hypothèse d'un comportement élastique du béton du sous-radier bloquant, un pic de contrainte de l'ordre de 16 N/mm² apparaît au bord du sous-radier, alors qu'en moyenne la contrainte normale transmise est de l'ordre de 4 N/mm² (voir figure ci-dessous).

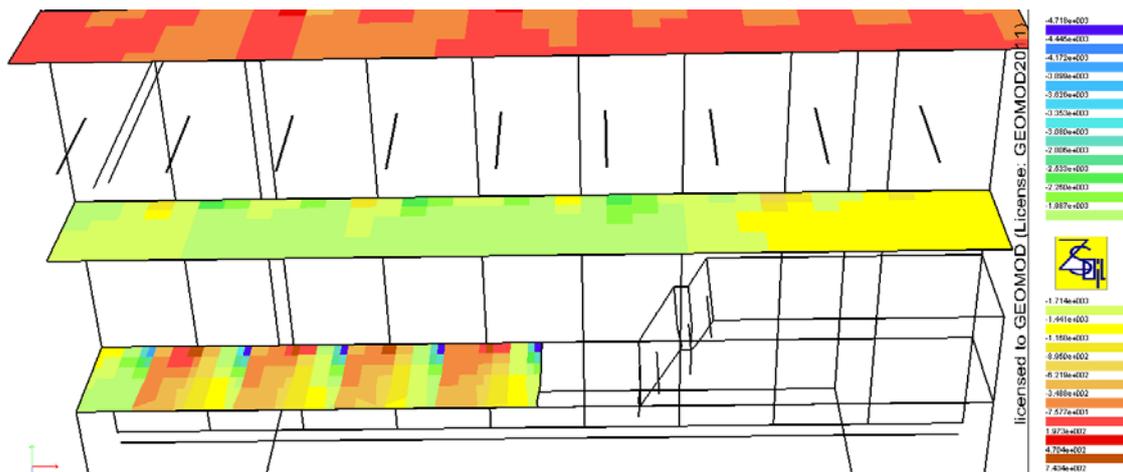


Figure 7 Efforts normaux dans les éléments de butonnage des parois moulées [kN/m]

- Une défaillance du sous-radier bloquant avec une résistance limitée à 5 N/mm² au moment de la prochaine étape de terrassement a été prise en compte en tant que situation accidentelle. Les résultats des calculs par éléments finis mettent en évidence que les déplacements et efforts au niveau de la paroi moulée n'augmentent que légèrement et les efforts moyens dans le sous-radier varient très peu.

4.5 Conséquences pour l'exécution

Pour l'exécution, les différentes situations de projet étudiées ont mené :

- à mettre en œuvre un réseau de piézomètres complémentaires en début de chantier afin de valider le modèle hydrogéologique de projet. ces piézomètres ont été équipés de plusieurs cellules de pressions indépendantes et dénivelées, de manière à mesurer et suivre la distribution des pressions interstitielles avant et pendant l'exécution de la tranchée couverte.
- en cas de divergence avec les hypothèses de projet, à prévoir un réseau de puits de décharges intermédiaires aux puits de pompage Ø 0.80 m
- à fixer la longueur de la fiche des parois moulées à un maximum de 7 m dans la zone la plus profonde,

- à prévoir un jeu de butons amovibles pouvant être mis en place en urgence en cas d'interruption fortuite de la procédure d'exécution de la dernière étape de terrassement empêchant le bétonnage du sous-radier (panne centrale à béton, grève, etc.),
- à fixer des exigences spécifiques sur les performances à 12h du béton du sous-radier bloquant.

5 Exécution de la tranchée couverte

5.1 Paroi moulée

L'exécution de la paroi moulée dans les sols de retrait ayant posé problème lors de la construction du tunnel de la Micheline a été difficile. Des conditions hydrogéologiques défavorables ont en effet été rencontrées, avec une nappe superficielle proche de la surface. D'autre part, la proximité des installations de chantier et de soutènements de fouille de grande hauteur a localement provoqué une forte asymétrie de la poussée des terres durant la creuse. Ces conditions, peu compatibles avec la stabilité des tranchées en cours d'excavation, ont nécessité la mise en œuvre de puits de pompage supplémentaires le long de la tranchée couverte, ainsi que la réduction de la largeur des panneaux. Une bonne partie des panneaux de parois moulées de la tranchée profonde a ainsi été exécutée en panneaux unitaires d'une largeur de l'ordre de 3 m. Le rehaussement des plateformes de travail et du niveau de bentonite a également été nécessaire localement. Au final toutefois, grâce à un équipement performant et du personnel compétent, l'entreprise adjudicataire a mené à bien la réalisation des parois moulées et permis le démarrage des terrassements.

5.2 Terrassements

Les terrassements se sont déroulés sans problème particulier et selon le mode opératoire prévu. La dernière étape de terrassement, redoutée d'un point de vue logistique, s'est en particulier bien passée et a pris fin à la mi-septembre. La mise en œuvre des butons de secours n'a en particulier jamais été nécessaire.

5.3 Mesures de suivi

5.3.1 Mesures piézométriques

Les piézomètres à cellules de pressions mis en œuvre en début de projet ont confirmé les observations faites dans le cadre d'autres chantiers genevois exécutés dans des sols similaires, à savoir une réduction graduelle de la pression interstitielle dans les sols de retraits fins (6d) et les sols morainiques (7d) en référence au modèle hydrostatique (situation de départ avant exécution puits Ø 0.80 m et démarrage pompage).

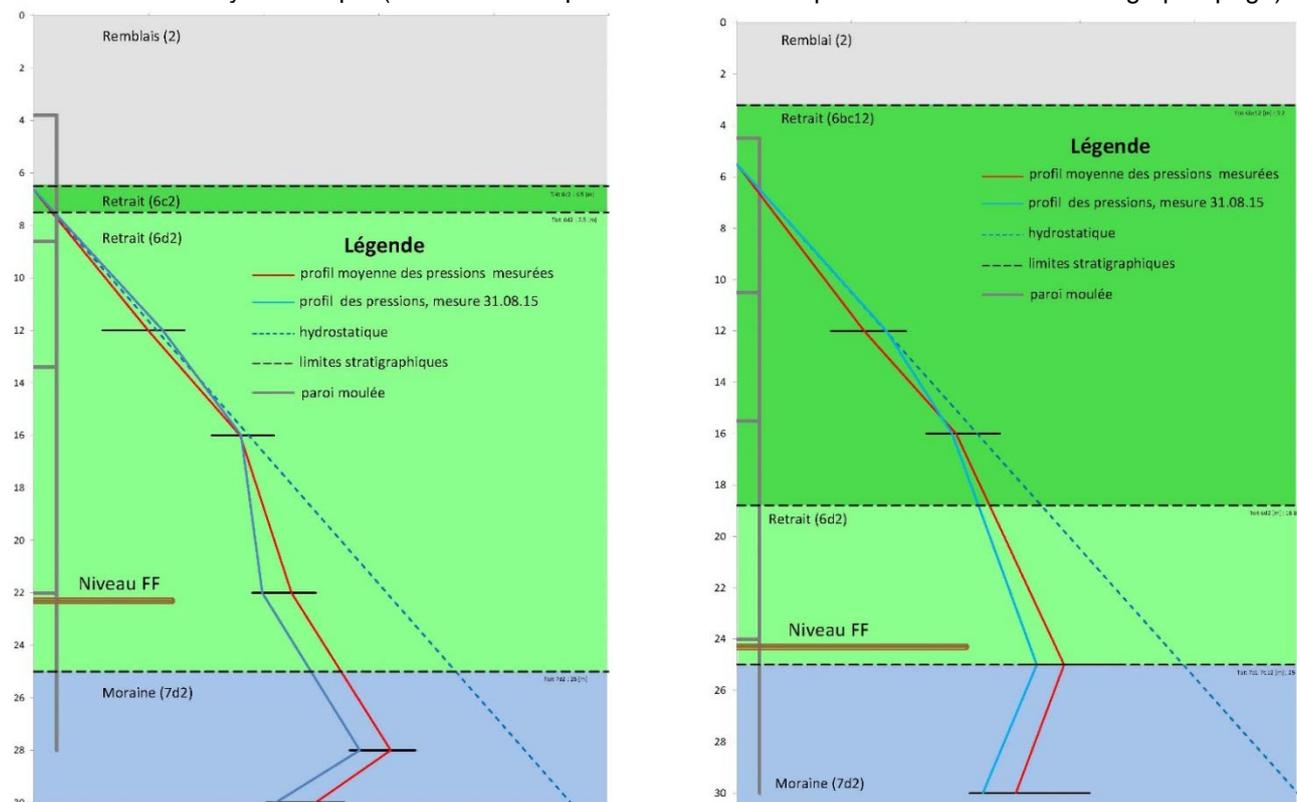


Figure 8 Enveloppe des pressions interstitielles mesurées aux pk 71.14 et 71.20

Cette réduction des pressions dans les formations fines est déjà observée avant travaux et est légèrement accentuée en cours d'excavation, en lien avec le pompage. Ainsi, les conditions étant plus favorables que celles admises dans les différentes situations de projet, il n'a pas été nécessaire de mettre en œuvre les puits de décharges intermédiaires.

5.3.2 Mesures inclinométriques

Les mesures inclinométriques réalisées sur la tranchée profonde ont mis en évidence une ampleur de déformation un peu inférieure aux estimations de projet (facteur environ 2), généralement de l'ordre de 20 mm en ventre dans la zone de la tranchée profonde. La prudence admise dans la définition du modèle géotechnique, en particulier au niveau des pressions interstitielles, explique cet écart. Par ailleurs, dans le cadre de l'étude paramétrique, le modèle par éléments finis considérant la présence de 2 nappes distinctes, prédisait des déformations de l'ordre de 20 mm, ce qui avait été considéré comme l'approche optimiste en terme de déformations. Il sera intéressant de revenir sur ces résultats et de procéder à une rétro-analyse, en tenant compte des observations faites au niveau de l'eau.

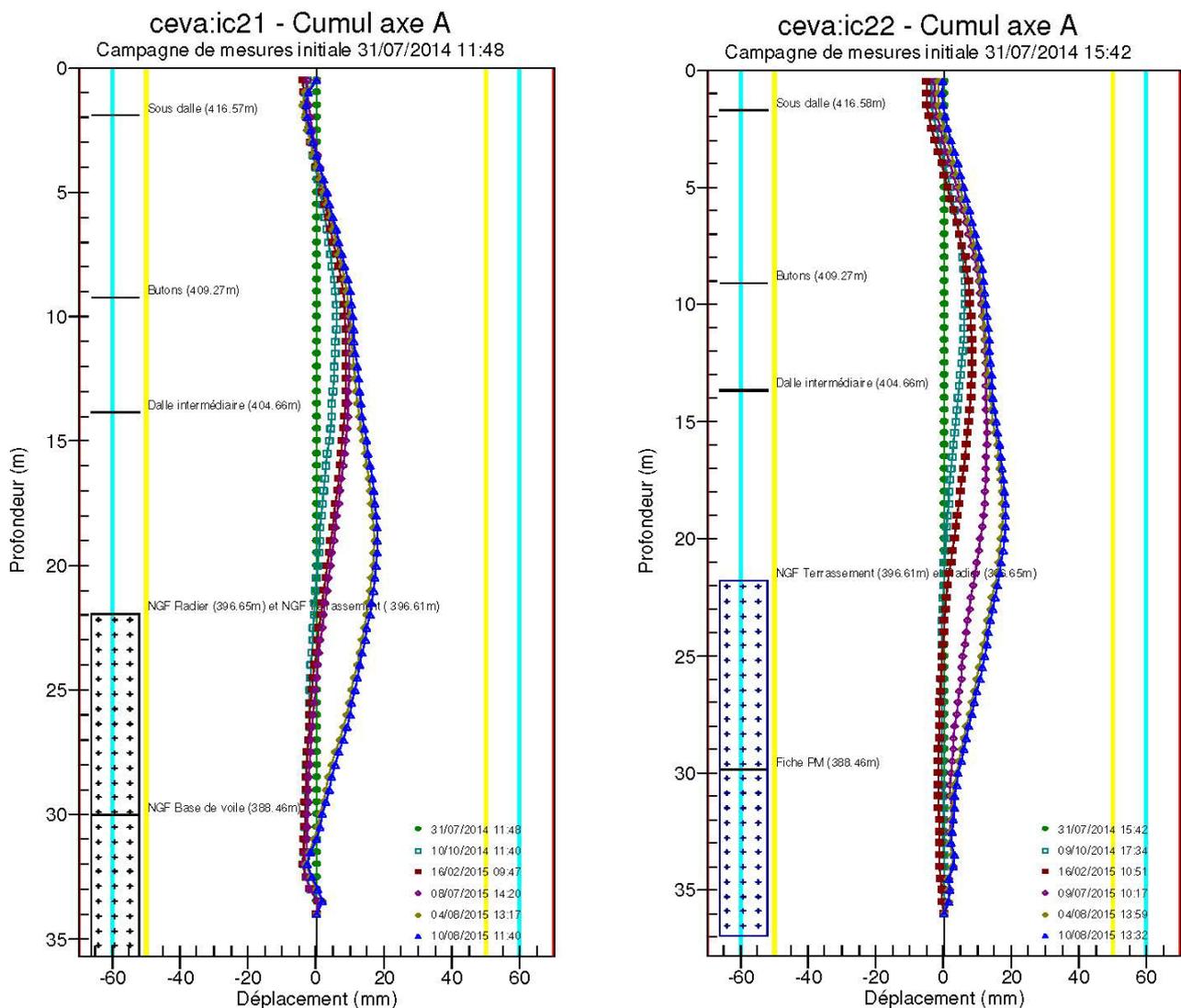


Figure 9 Mesures inclinométriques nord (ic21) et sud (ic22) au pk 71.18

6 Conclusion

Les études et mesures de suivi menées dans le cadre de la tranchée couverte profonde du Lot 7 ont mis en évidence l'importance des hypothèses du modèle hydrogéologique de projet et ses influences déterminantes sur le dimensionnement des parois moulées. Par rapport à une approche simplifiée aux modules de réaction avec distribution hydrostatique des pressions interstitielles, les modélisations aux éléments finis couplées aux observations in situ ont permis de réduire et d'optimiser la profondeur des fiches des parois moulées. Pour un ouvrage linéaire comme le CEVA, ces gains sont substantiels et justifient la mise en œuvre d'un ré-

seau piézométrique permettant une évaluation réaliste des pressions interstitielles en fonction de la profondeur.

Auteur:

Alain Oulevey
Ingénieur civil EPFL SIA
De Cérenville Géotechnique SA
Ecublens – Neuchâtel – Genève