

Zeitschrift: Tracés : bulletin technique de la Suisse romande
Herausgeber: Société suisse des ingénieurs et des architectes
Band: 129 (2003)
Heft: 08: Fondations d'horloger

Artikel: Blindage de fouille: une solution innovante
Autor: Kruger, Gaston
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-99201>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 10.02.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Blindage de fouille : une solution innovante

La réalisation de fouilles de grande dimension pose inévitablement le dilemme du choix du système de blindage (fig. 1). Dans les terrains genevois, il n'est pas rare de rencontrer des sols argileux excluant l'usage de tirants d'ancrage, ce qui conduit inévitablement l'ingénieur à proposer un butonnage dense et souvent complexe à mettre en œuvre. Selon la nature du sol et en fonction des déformations acceptables pour le voisinage, l'optimisation entre le nombre d'étais et de niveaux de butonnage s'avère difficile.

Dans le cas d'un sol mou excluant l'application de tirants d'ancrage, l'ingénieur doit s'appuyer sur l'expérience et le savoir-faire de géotechniciens et d'entreprises ayant une solide expérience de ce type de terrain. En effet, un désordre structurel de l'étayage ou des mouvements importants de l'enceinte peuvent affecter le planning de la construction et les coûts du chantier, se traduire par des dommages et des pertes d'exploitation subis par les bâtiments avoisinants, sans parler des séquelles pour l'image de marque du maître de l'ouvrage.

La réussite d'un grand projet de travaux spéciaux implique donc une synergie entre l'ingénieur civil, le géotechnicien et l'entreprise réalisant les travaux. C'est pourquoi les mandataires du chantier de Plan-les-Ouates ont favorisé la collaboration active de l'entreprise adjudicataire à la mise au point du projet exécution. Auteur de la variante choisie, *SPIE Fondations* a ainsi participé pleinement aux discussions pour le dimensionnement général (mise au point de la variante), la conception des détails constructifs, la planification générale et le contrôle des plans d'exécution avant la réalisation des travaux. De cette manière, la fouille a pu être réalisée en garantissant une mise en place aisée des éléments, un comportement sans faille du système d'étayage, le respect rigoureux du calendrier général et des coûts prévus en soumission.

Le projet d'infrastructure dans son ensemble a été réalisé en mettant l'accent sur trois pôles distincts :

- modélisation et études paramétriques intégrant au fur et à mesure des modèles de plus en plus complexes et d'ap-

proximes très différentes (voir article en pages 25 à 32) et séminaires de discussion ingénieurs - entreprise afin de valider les modèles et les résultats ;

- contrôles soutenus de la qualité d'exécution sur le chantier (géométrie, matériaux, mise en place, etc.);
- auscultation du blindage et dépouillement en temps réel des résultats afin de connaître l'évolution de la fouille et de permettre une correction immédiate de la géométrie de l'étayage.

Problématique

Située dans une zone industrielle près de Genève, la fouille de Plan-les-Ouates occupe une surface de 22 000 m² sur une parcelle de 25 000 m², dont 5500 m² sont constitués d'impressionnantes galeries techniques. La parcelle présente une faible pente en direction du nord-ouest et se trouve de 1,0 à 1,5 m en contrebas des routes bordières.

Les contraintes majeures du projet découlent de :

- la dimension et la profondeur de la fouille,
- la nature du sol,
- le calendrier général,
- la structure du bâtiment.



Fig. 1 : Vue générale de la fouille et du système d'étayage

Fig. 2: Dimensions de la fouille et coupe schématique des niveaux de terrassement et d'étaillage

Fig. 3 : Coupe schématique des sous-sols et des terrains

Fig. 4: Engin de terrassement dans les sols argileux

Fig. 5 : Travaux de stabilisation de la plate-forme de travail à la chaux et au ciment sur plus de 22 000 m²

Fig. 6: Rupture d'un talus sur plus de 60 m de longueur

Fig. 7: Manutention d'une cage d'armature en té de paroi moulée

Dimension et profondeur de la fouille

Face à l'impossibilité de recourir à des tirants d'ancrage, la dimension de la fouille est certainement la contrainte majeure à laquelle l'ingénieur a été confronté pour définir le système d'étayage. Sa longueur moyenne est de quelque 160 m pour une largeur de 135 m, tandis que la profondeur par rapport au terrain naturel est de -13,45 m avec des galeries techniques allant jusqu'à -18,65 m (fig. 1).

Pour répondre à cette contrainte, le géotechnicien a proposé une segmentation intérieure, afin de couper les longs côtés pour réduire les déplacements en fond de fouille. Pour la solution de base, cette segmentation a été réalisée par le biais de quatre parois moulées de blocage (dont deux assurant le soutènement de la galerie technique principale) et de deux parois moulées d'étayage (fig. 8).

Nature du sol

La plaine de l'Aire correspond à un profond sillon dans le substratum molassique qui prolonge la dépression du Petit Lac. Il est comblé par une succession de terrains morainiques au fond, compacts, puis par une grande épaisseur de formations fines supraglaciaires de retrait würtmien. Ce sont essentiellement des argiles et des limons argileux, mous à tendres, saturés, compressibles.

Entre 5 et 40 m de profondeur, les argiles présentent des paramètres géomécaniques particulièrement faibles, avec notamment des teneurs en eau très élevées, des poids volumiques très faibles, et une très grande compressibilité. A l'instar de la « terre glaise » de notre enfance, ce type de sol se prête idéalement à la poterie (fig. 4). En revanche, les engins de chantier lourds tels que les grues mobiles pour creuser les parois moulées, les camions de terrassement et les pelles mécaniques s'y enfoncent inévitablement en cas de fortes pluies et appellent l'aménagement de pistes pour éviter l'interruption des travaux de fondation. Ainsi, la plate-forme de travail pour l'exécution des parois moulées et des cages d'ar-

mature a nécessité une stabilisation du sol à la chaux et au ciment pour en garantir la pérennité durant les quatre mois de travaux (fig. 5).

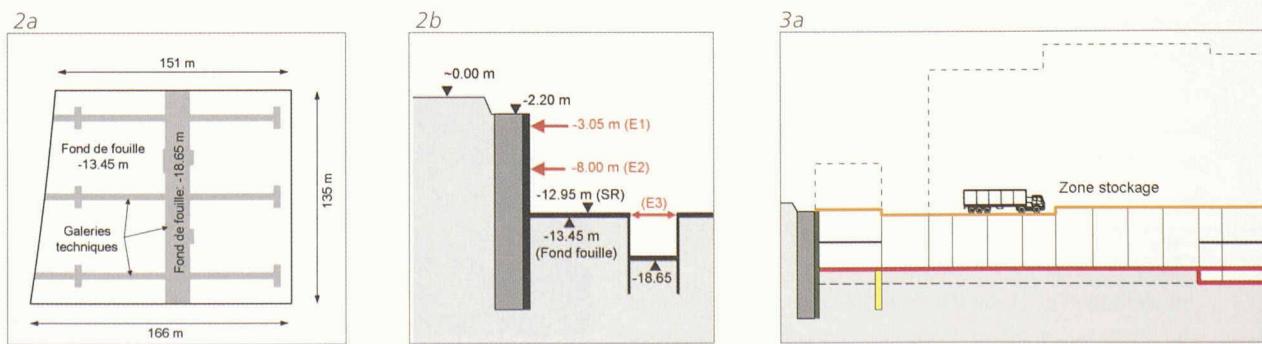
Lors du terrassement, le sol argileux présente des caractéristiques très différentes à court et long terme. Si à court terme, les talus peuvent en effet demeurer quasiment verticaux sur une hauteur de plus de 8 m - facilitant d'autant le travail du terrassier - les talus inclinés à 33° (2/3) sur une hauteur de 12 m s'avéraient en revanche instables à long terme. Heureusement sans conséquence, une impressionnante rupture de talus sur plus de 60 m de longueur est d'ailleurs venue rappeler aux ingénieurs et aux entreprises la prudence extrême à observer face à cette argile (fig. 6).

Pour les éléments de construction, l'argile présente des caractéristiques très médiocres. En effet, les ancrages ont une capacité très réduite et une tendance à fluer au court du temps, ce qui les rend peu performants dans un terrain aussi mou. Les fondations du futur bâtiment doivent réduire au maximum les pressions sur le sol afin d'éviter des tassements différentiels, c'est pourquoi la fondation est constituée d'un radier de forte épaisseur.

A partir de 40 m de profondeur, on trouve un sol morainique composé de graviers perméables avec une nappe phréatique en charge s'écoulant en direction de la station d'eau potable de Vessy. Afin de ne pas contaminer les eaux, le géologue cantonal a prononcé une interdiction formelle de percer cette couche condamnant ainsi toutes les variantes se fondant dans ce sol.

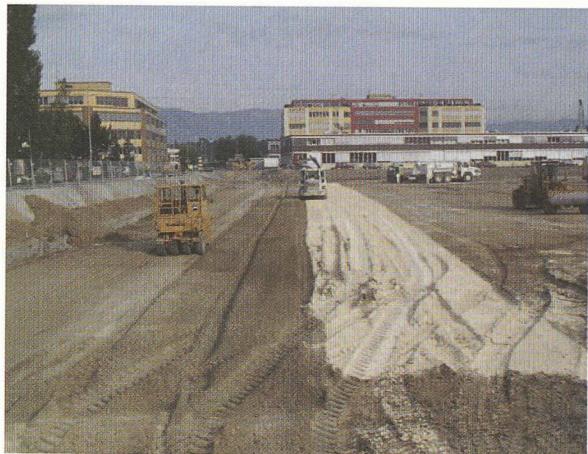
Calendrier général

La construction de l'unité de production horlogère de Plan-les-Ouates s'inscrit dans une planification très courte et très tendue. Afin de réduire au minimum les délais, tous les lots ont été planifiés avec un enchaînement au plus court obligeant à démarrer le gros-œuvre avant la fin du terrassement en pleine masse.





4



5



6



7

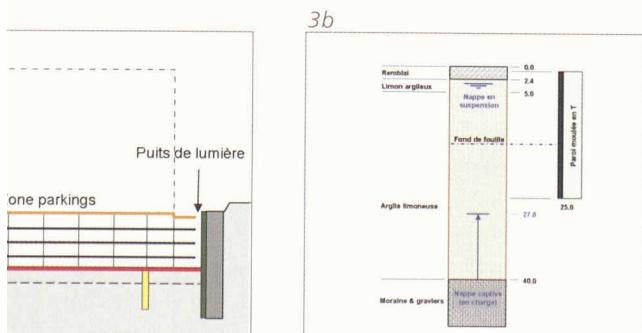
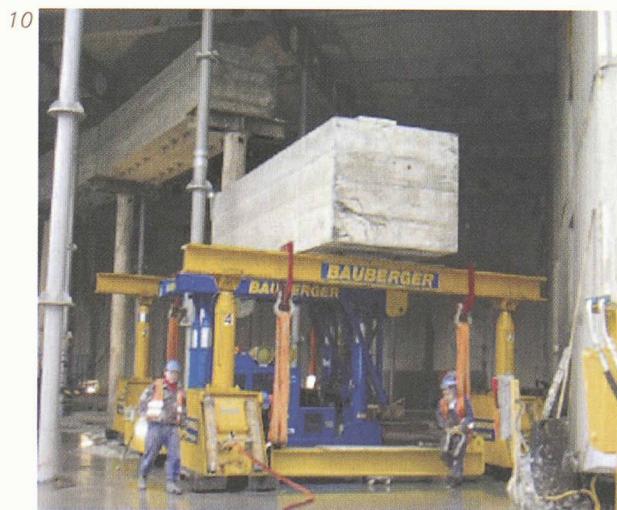
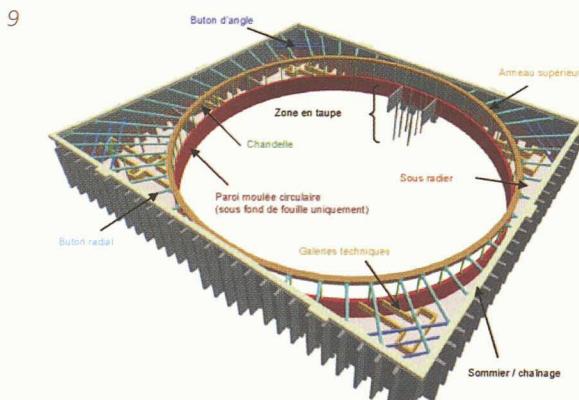
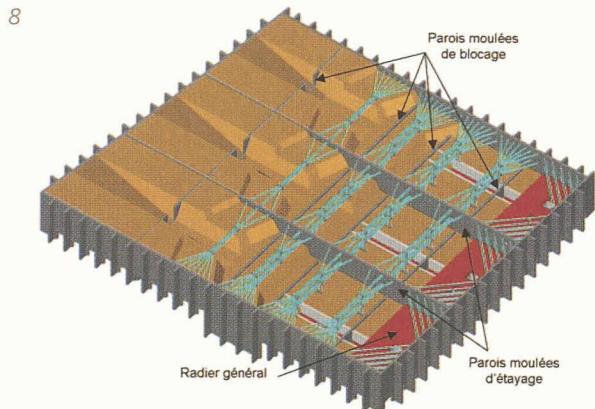


Fig. 8: Solution de base proposée en soumission

Fig. 9: Variante retenue en « roue de vélo »

Fig. 10: Démontage de la partie de l'anneau sous la dalle du rez-de-chaussée à l'aide de quatre vérins hydrauliques (poids maximum des éléments : environ 120 tonnes)



Solution de base

La solution proposée en soumission prévoyait la réalisation de deux parois moulées d'étayage permettant de couper la largeur de la fouille en trois cellules identiques (fig. 8). Chacune de ces cellules nécessitait un étayage à l'avancement par des étais en éventail sur deux niveaux distincts. Avec un sous-radier à l'avancement pour limiter les déformations en fond de fouille, le démontage de l'étayage aurait pu débuter dès les premières étapes de radier coulées. Cette variante s'inscrivait dans la logique de planification des trois bâtiments principaux. Ces trois bâtiments, respectivement G-H, J-K et M-M, s'inscrivaient en effet dans chacune des cellules, entre les deux parois moulées d'étayage, parois qui auraient été détruites au fur et à mesure de l'avancement du radier pour réaliser les cours intérieures entre les bâtiments en temps masqué.

Quatre parois moulées de blocage permettaient de « couper » les quelque 160 m de la grande longueur en cinq cellules distinctes, deux de ces parois étant destinées au blindage de la future galerie technique centrale profonde de plus de 18 m.

Cette solution présentait l'avantage d'appliquer un système d'étayage ayant déjà fait ses preuves à plusieurs reprises dans des sols genevois et pour des fouilles de profondeur semblables. Par contre, la maîtrise du calendrier aurait certainement été très difficile compte tenu du fait que les étais d'une même rangée doivent être mis en précontrainte simultanément et que cette opération doit être menée en parallèle avec le terrassement.

Variantes proposées par les entreprises

Vu l'importance des travaux (envergure de la fouille et montant financier) et l'invitation à rechercher des optimisations, les entreprises de travaux spéciaux ont proposé au total quatre variantes qui ont été méticuleusement analysées par l'équipe de projet. Celles-ci portaient uniquement sur le système d'étayage à l'exclusion de toute modification de l'enceinte de fouille.

Seules deux variantes ont été jugées techniquement acceptables, à savoir une proposition de *SPIE Fondations* (finalement mise en place et décrite ci-après) et une autre de *Zschokke-Locher*. Cette dernière exploitait toutes les parois moulées de blocage et d'étayage de la solution de base pour diviser la fouille en neuf cellules distinctes, dont chacune n'était pourvue que d'étais d'angle. Les parois moulées plongeaient en direction du fond de fouille au fur et à mesure qu'elles s'approchaient du centre, qui demeurait ainsi libre de tout encombrement. Après mises au point techniques,

cette variante ne présentait toutefois plus davantage au niveau financier et de la planification.

Une variante en « Jet Grouting » a été écartée compte tenu des risques inhérents à injecter les sols argileux par « Jetting » et de la difficulté d'exécution des galeries techniques en sous-œuvre (sous le radier constituée par le Jetting). Quant à une variante en « ancrages », elle a été rejetée en raison de la résistance insuffisante des ancrages dans des sols argileux, de déformations trop importantes de l'enceinte et d'empâtements des scellements sur le domaine public et privé.

Variante retenue

La variante de *SPIE Fondations* s'inspire de la technique de la roue de vélo, à la différence près que les rayons sont placés à l'extérieur de la jante (fig. 9). Dans ce cas, les butons (rayons) transmettent uniquement des forces de compression de l'enceinte extérieure à un anneau préfabriqué en béton (jante). La forme en anneau permet de dévier les forces de compression et d'obtenir une rigidité très importante du système, offrant, comme la roue de vélo, une efficacité remarquable moyennant un encombrement réduit. Plus de 63% de la fouille demeure ainsi libre d'étayage, favorisant des rendements de terrassement importants.

Sous le fond de fouille, une autre roue de vélo constitue le deuxième niveau d'étayage. Dans ce cas, on peut parler de roue lenticulaire, car les rayons extérieurs sont matérialisés par un sous radier en béton continu comblant le vide entre une paroi moulée circulaire (jante) et l'enceinte de fouille extérieure. Contrairement au niveau supérieur, le sous radier et la paroi moulée circulaire ne sont pas démontés à la fin des travaux de fondation vu que ses éléments sont situés sous la future fondation du bâtiment.

Par rapport à la solution de base et aux autres propositions, cette variante offrait non seulement un gain financier, mais encore une grande souplesse pour le terrassement vu que la nature même de l'anneau permet une libération totale du centre de la fouille. Comparée à la solution de base, cette variante garantissait à la fois le respect des délais pour l'ensemble des travaux spéciaux et pour l'enchaînement des travaux de structure. Dans les faits, le terrassier en a pleinement profité, puisque les rendements ont parfois atteint plus de 5000 m³ par jour.

Le plein potentiel de la variante aurait été obtenu si les bâtiments du milieu (bâtiments J et K) avaient été prioritaires pour le maître de l'ouvrage, une rocade qui n'était malheureusement pas envisageable.

Géométrie

La géométrie de l'anneau et de la paroi moulée circulaire est donnée par deux demi-cercles de 66,67 m de rayon séparés par deux méga plats de 4,46 m. L'anneau présente une section de 4 m² dont 2,1 m de largeur et 1,9 m de hauteur, ce qui permet de l'intégrer en plan et en élévation à travers les dalles et les colonnes du parking. La distance minimale de projet des éléments d'étayage par rapport à la structure du bâtiment est de 12 cm (distance théorique sur plan avant la déformation de l'anneau et les tolérances géométriques). En section, l'anneau est composé de quatre tranches distinctes empilées verticalement. L'élément préfabriqué inférieur, de part sa forme en auge, permet la circulation du futur chariot pour le démontage. Cette solution de démontage des éléments sous le bâtiment à l'aide d'un chariot a finalement été abandonnée au profit d'un démontage depuis le radier par des vérins (fig. 10).

Compte tenu des faibles tolérances géométriques, un géomètre a été mandaté pour effectuer un contrôle systématique des éléments constituant l'anneau et la paroi moulée extérieure lors de toutes les phases de mise en place des éléments.

Du point de vue technique, cette variante a nécessité une longue mise au point, afin de trouver un découpage des parois moulées et une géométrie de l'anneau permettant d'éviter tous les noyaux et quasiment toutes les colonnes des futurs bâtiments. Les contraintes du calendrier ont toutefois obligé au démontage de l'anneau dans l'embarras des bâtiments G et H (voir fig. 2 p. 10). En effet, le démontage de l'anneau ne peut commencer qu'une fois achevé le bétonnage intégral du radier - qui constitue le seul appui définitif de l'enceinte de fouille. La conception de l'anneau et des butons doit alors favoriser un démontage aisé et rapide à plus de 10 m de hauteur par rapport au radier général (voir encadré p. 23).

Système statique

La variante de *SPIE Fondations* se caractérise par un seul niveau d'étayage actif (anneau préfabriqué + butons radiaux) et un niveau passif en fond de fouille (paroi moulée circulaire + sous-radier). Localement, les butons d'angle viennent renforcer les parties de l'enceinte éloignées de la paroi moulée circulaire qui présentent des galeries techniques (fig. 9 et 13). Le niveau supérieur est composé d'un anneau en béton armé préfabriqué à haute performance B60/50 et de butons radiaux FeE355 de 1 m de diamètre (épaisseur des tubes pétroliers entre 16 mm et 23 mm). La force de compression dans les butons est comprise entre 500 et 1000 tonnes et celle de l'anneau est de 6000 tonnes. Les butons sont peints

Fig. 11: Système statique en stade de chantier et en stade définitif

Fig. 12: Positionnement des butons radiaux

Fig. 13: Butons d'angle

Fig. 14: Coupe type et photo d'une liaison entre l'anneau, le buton et la chandelle

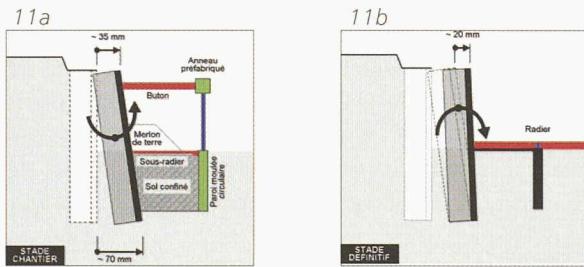
Fig. 15: Détail de liaison entre un buton incliné à 45° et la paroi moulée extérieure

Tableau I: Programmes de calcul utilisés pour la modélisation de la fouille

en blanc pour diminuer au maximum les effets de la température. Le nombre total de butons radiaux est de 46 dont 42 sont équipés d'un système de mise en précontrainte d'une capacité de 2 x 400 tonnes (système actif). La précontrainte a permis de limiter au maximum les déformations de l'enceinte tout en garantissant une forme optimale à l'anneau. Cette opération a été étalée sur une durée de deux semaines, vu la complexité que représentait la mise en tension de tous les butons de cette roue de vélo géante (fig. 12).

Les parois moulées extérieures sont liées en tête par un sommier raidisseur de 2 m x 1,9 m, dont l'armature importante doit pouvoir reprendre les forces de traction induites par les butons radiaux et les moments de flexion provenant des redents suspendus. En effet, seul un redent sur deux est directement lié à un buton radial.

Afin de maîtriser les déformations en fond de fouille, le blocage de la paroi moulée extérieure est assuré par l'action combinée d'un sous-radier en béton armé posé à l'avancement qui vient buter contre une paroi moulée circulaire (système passif, fig. 11a). On utilise les propriétés géomécaniques « court terme » afin de terrasser le dernier merlon sur une largeur de 10 m, puis bétonner le sous radier le même jour. L'épaisseur de cette paroi est de 1,2 m pour une hauteur de 9 m sous le sous-radier. Vu la contrainte de compression élevée dans la paroi moulée, le choix du béton s'est porté sur un B40/30 et cette paroi n'a été démontée que



Modèle « Sol-structure »	Modèle « structure-sol »
Dénébola ou Rideau (1D)	Effel (2D)
Plaxis (2D)	Axis (2D et 3D)
Z_Soil (3D)	Maps (3D)

12a



12b



dans les zones de conflit avec les galeries techniques, ce qui équivaut à environ 5% de son volume total.

Compte tenu de la nature du terrain et des dimensions de la fouille, les déformations au stade du chantier sont restées relativement faibles, à savoir quelque 35 mm en tête et 70 mm en pied de paroi moulée. Après le démontage de l'anneau, la déformation mesurée en tête après cinq mois a été au maximum de 20 mm (fig. 11b).

Modélisation

Afin de résoudre tous les problèmes liés à la complexité de la variante et à la nature du sol, la modélisation de la fouille a fait appel à des programmes d'approches différentes mais complémentaires (tableau I). Un groupe de travail composé dans un premier temps des bureaux Thomas Jundt - ingénieurs civils, Philippe Annen Structures, Guscetti & Tournier, Géotechnique Appliquée Dériaz (GADZ) et l'entreprise SPIE Fondations a participé à des réunions techniques toutes les deux semaines. Chaque nouveau modèle a été discuté et confronté aux modèles de calcul précédents. Grâce à son expérience et à sa base de données des sols genevois, le bureau GADZ a pu calibrer les modèles les plus complexes et vérifier l'ordre de grandeur des résultats numériques.

L'entreprise SPIE Fondations, auteur de la variante retenue, a participé activement à toutes les séances de conception et de modélisation afin de développer une forte synergie entre

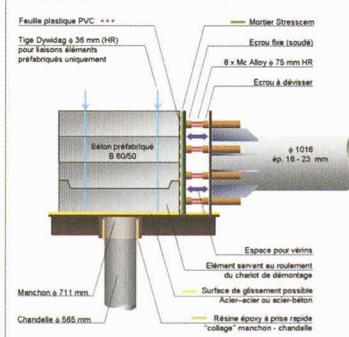
Détails constructifs innovants hors norme

La conception de l'anneau devait permettre de gagner du temps au montage et surtout au démontage à la façon d'un mécano géant. En effet, la philosophie globale d'assemblage des éléments formant l'anneau supérieur consiste à pouvoir reprendre uniquement les efforts de compression. Liés par contact ou uniquement par un coulis de ciment à haute résistance, tous les éléments ont été préparés en usine et montés à la grue mobile sur le chantier.

Les quatre éléments préfabriqués constituant la section de l'anneau sont solidarisés entre eux par des tiges précontraintes *Dywidag* (36 mm pour éviter le flambage). La continuité de l'anneau au niveau des butons est assurée par un mortier injection « *StressCem* » bordé de deux feuilles plastique PVC empêchant le collage et la perte de coulis entre les éléments préfabriqués. La liaison entre les butons et l'anneau obéit au même principe. L'anneau supérieur repose sur les têtes de chandelles qui permettent le glissement indispensable des éléments entre eux pour la mise en précontrainte (fig. 14). Quant à la liaison entre la paroi moulée et les butons, elle est constituée d'un film de mortier « *StressCem* » transmettant les forces de cisaillement jusqu'à un angle de 46° (fig. 15), un détail novateur qui a suscité de nombreuses discussions entre SPIE Fondations et les ingénieurs. Lors de la mise en précontrainte, tous les assemblages ont été testés jusqu'à une force de 800 tonnes. Enfin, la conception des assemblages uniquement en compression a permis un démontage rapide des éléments et leur recyclage à la fin du chantier.



14



15

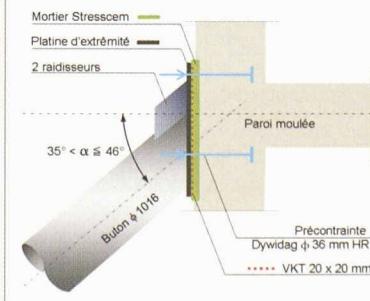
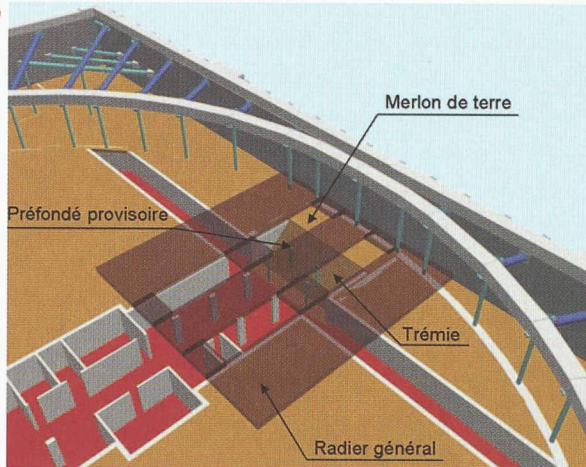


Fig. 16 : Réalisation en taupe du terrassement des galeries techniques contre la paroi moulée circulaire. Le merlon de terre permet d'offrir une butée provisoire jusqu'à la réalisation du radier général

Fig. 17 : Phases d'exécution de la fouille

(Tous les documents illustrant cet article ont été fournis par l'auteur)

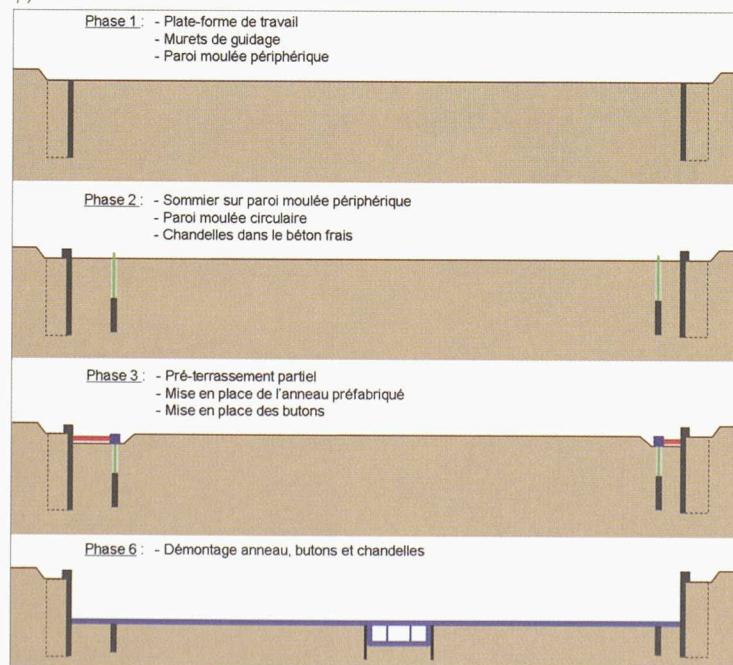
16a



16b



17



tous les acteurs du projet. Suite à la décision par les mandataires d'effectuer une modélisation 3D « sol-structure » à l'aide du programme de calcul Z_Soil 3D, le groupe de travail s'est vu élargi par la présence du bureau De Cérenville Géotechnique.

Difficultés géotechniques supplémentaires : les galeries techniques

Le creusement des galeries techniques d'une profondeur de 5 m constitue une difficulté supplémentaire qui a été prise en compte dans le concept général de la variante. Tout d'abord, ces galeries coupent le sous-radier à l'extérieur de l'anneau qui doit transmettre les efforts de compression à la paroi moulée circulaire. Un phasage de battage des palplanches et de mise en place des étais dans les galeries a donc été nécessaire afin de conserver la continuité du sous-radier. Lorsque ces galeries s'approchent de l'enceinte extérieure, les étais d'angle viennent en outre renforcer le dispositif.

Ensuite, la galerie technique principale se prolonge jusqu'au niveau de l'enceinte de fouille à l'intérieur de l'anneau, ce qui porte localement le niveau du fond de fouille à plus de 18 m. Les efforts supplémentaires induits par ce terrassement sur la paroi moulée circulaire auraient conduit à augmenter sa section de plus de 40%. Afin de réduire les coûts et de respecter le calendrier général, le choix s'est porté sur la réalisation en taupe de 300 m² de radier de la galerie technique, les fondations provisoires du bâtiment étant assurées par huit pieux flottants et par deux parois moulées (fig. 16).

Conclusion

La réalisation du blindage de la fouille de Plan-les-Ouates par deux anneaux de 132 m de diamètre, l'un composé d'un anneau préfabriqué en béton et de butons radiaux, l'autre d'une paroi moulée circulaire et d'un sous-radier a été un succès total. En effet, cette solution a permis de limiter au maximum les tassements des bâtiments voisins, tout en permettant de respecter rigoureusement le calendrier général très serré imposé par le maître de l'ouvrage.

La réalisation d'un projet aussi audacieux dans des délais aussi courts n'a pu être menée à bien que grâce à une équipe de projet pluridisciplinaire et complémentaire ayant dès le début de la conception intégré l'entreprise adjudicataire des travaux.

Gaston Kruger
Thomas Jundt - Ingénieurs civils
Fontenette 27, CH - 1227 Carouge