

GARE PART DIEU A LYON - CONCEPTION D'UNE FOUILLE BUTONNEE DE GRANDES DIMENSIONS EN MILIEU URBAIN TRES CONTRAINT

PART DIEU RAILWAY STATION - LYON - DESIGN OF A LARGE EXCAVATION IN A VERY CONSTRAINED URBAN ENVIRONMENT

Charles BERNUY¹, Alexandre BEAUSSIER² et Simon GRÉNERY³

¹Terrasol, Lyon, France

²Terrasol, Lyon, France

³Terrasol, Lyon, France

RÉSUMÉ – La réalisation de fouille butonnée en milieu urbanisé fait l'objet de nombreux défis en conception : maîtrise de l'impact sur les structures existantes, phasage contraint, exiguïté des emprises, nombreux sujets d'interface. La réalisation d'un parking souterrain en top and down au cœur du quartier de la Part-Dieu dans un contexte géotechnique alluvionnaire sous nappe, avec une forte asymétrie des poussées des terres, font de ce projet une référence dans la métropole lyonnaise.

ABSTRACT – The construction of a large excavation in an urban environment is subject to numerous design challenges: control of the impact on existing structures, constrained phasing, limited space, interface issues. The construction of a top-and-down underground car park in the heart of the Part-Dieu district in an alluvial geotechnical context under the water table, with a significant asymmetry of earth pressures, makes this project a reference in the Lyon metropolitan area.

1. Description du Projet

La gare de la Part-Dieu et ses abords sont en train de connaître des évolutions importantes à court et moyen terme pour faire face aux perspectives d'augmentation du trafic ferroviaire, liées aux évolutions du quartier et de la métropole lyonnaise. Actuellement la gare n'est plus en mesure d'absorber la demande croissante de voyageurs. Initialement prévue pour accueillir 35 000 voyageurs par jour, elle en accueille aujourd'hui 3 fois plus. Afin de désaturer et mettre en sécurité la gare et les quais tout en augmentant la capacité et en valorisant les modes de déplacements actifs à horizon 2030, plusieurs opérations interconnectées sont prévues d'ici 2024.

1.1. Le Parking Place Basse

L'espace public en surface, déjà saturé, n'étant pas en mesure d'accueillir le développement des fonctionnalités multimodales à hauteur des besoins identifiés, un ouvrage souterrain est prévu sous la place Béraudier pour améliorer les conditions d'accueil des voyageurs. Cet ensemble nommé Parking Place Basse (PPB) présente une emprise au sol d'environ 13 600 m² (80m x 170m) pour 4 niveaux de sous-sol (arase supérieure du niveau -4 descendue 16 m sous le terrain naturel) et permettra de superposer :

- Une place basse donnant accès au métro et intégrant une station de taxis, une vélostation d'environ 1500 places, ainsi qu'une offre de services et commerces ;
- Un parking minute d'au moins 60 places et un parking motos de 155 places (niveau -2) ;
- Un parking longue durée d'au moins 1000 places (niveaux -2, -3 et -4) ;

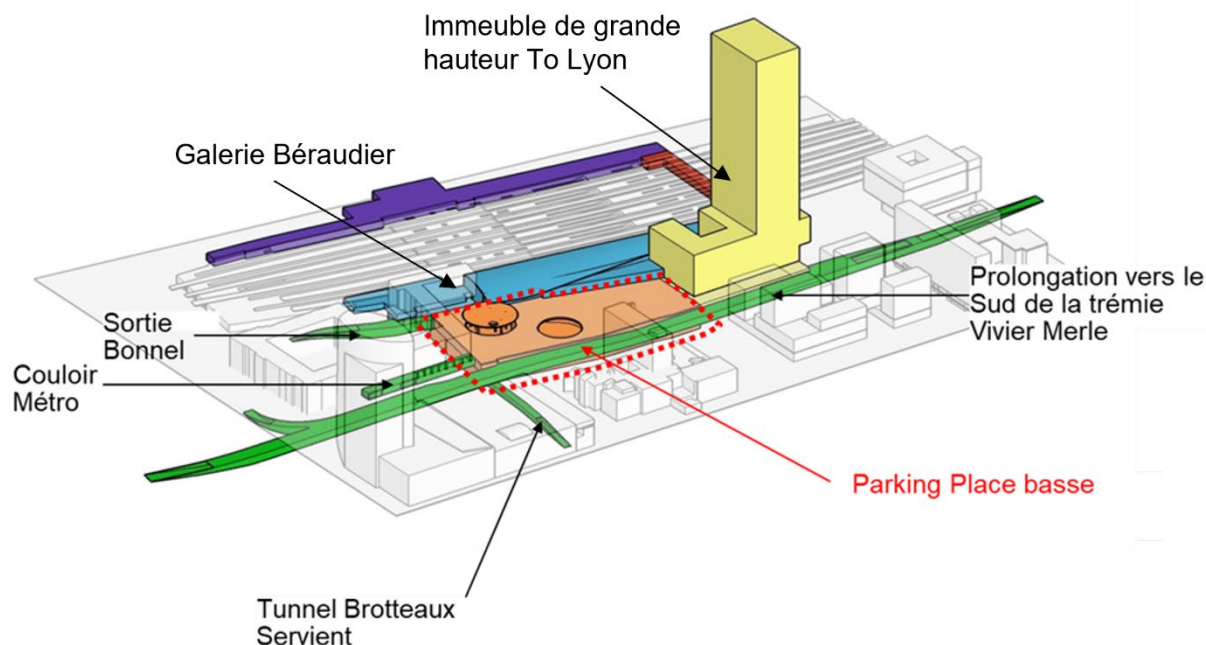


Figure 1. Organisation des programmes constituant le PEM

Ces équipements seront accessibles en arrivant par le Tunnel Vivier Merle (TVM, en vert sur la Figure 1), qui a été prolongé vers le Sud en 2019/2020. Les sorties en direction de l'Ouest s'effectueront par la rue Servient (via un passage souterrain dénommé sortie Brotteaux-Servient, passant sous le TVM), permettant de rejoindre les quais du Rhône et le centre-ville. Une sortie réservée aux taxis et aux livraisons par la rue de Bonnel permettra également de rejoindre l'Est lyonnais. L'ouvrage PPB est également borné à l'est par le projet de la Galerie Béraudier (réaménagement du hall de gare SNCF, en bleu) et le nouvel ensemble hôtel et tour To Lyon, qui verront le jour en même temps que le PPB (en jaune).

A proximité immédiate du projet, côté est, on notera la présence d'un mur de soutènement existant de 8 mètres de hauteur, supportant les voies ferrées de la gare la Part-Dieu, et apportant d'importantes charges sur l'ouvrage (Figure 2).



Figure 2. Vue en coupe de projet PPB

1.2. Les contraintes de services

Dans ce contexte très urbanisé, avec notamment la présence des voies SNCF, ce projet doit faire face à de nombreuses contraintes fonctionnelles, dont :

- La nécessité de maintenir en continu l'accès à la gare SNCF de la Part-Dieu aux flux de voyageurs ;

- La présence d'ouvrages sensibles tels que le mur de soutènement et les voies SNCF côté est et le Tunnel Vivier Merle côté ouest ;
- Un phasage général de l'opération imposant une réalisation en *top and down* ;
- Un système de poutres et dalles butonnantes de très grandes dimensions mais de faible épaisseur, limitant la section de béton en compression. Cette solution de butonnage réalisé à la descente implique également l'impossibilité de réaliser des bandes de clavage. Ainsi, au vu de leur longueur, les effets du retrait et du fluage des éléments butonnant seront significatifs et sont à prendre en compte dans le dimensionnement des soutènements ;
- La volonté architecturale de faire du futur hall d'accueil de la gare (1^{er} niveau de sous-sol) un espace aéré avec une partie en mezzanine, limitant la capacité de butonnage en tête (double hauteur) ;
- Une forte dysmétrie des chargements avec côté est un mur de 8 m de hauteur soutenant les voies SNCF et côté ouest une tranchée couverte (TVM) apportant au contraire peu de poussée à l'arrière de la paroi moulée.

A ces contraintes de services s'ajoutent la nécessité de limiter les déformations sur les ouvrages existants, en particulier les déformations sur les voies SNCF imposés par les règlements SNCF (IN 90033).

1.3. Contexte géologique et hydrogéologique lyonnais

Le projet PPB et plus généralement le quartier de La Part-Dieu reposent sur des alluvions fluviales modernes appartenant principalement aux plaines alluviales du Rhône. Ces dépôts sablo-graveleux sont présent sur 20 m d'épaisseur environ et surmontent un substratum molassique (sables fins indurés).

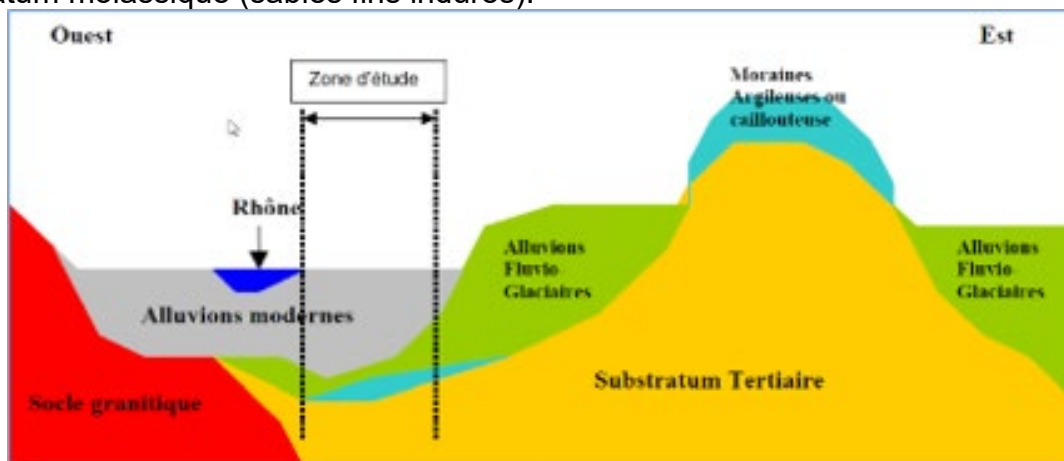


Figure 3. Schéma de la disposition des principales formations géologiques (source : rapport BRGM - Connaissance hydrogéologique du sous-sol de l'agglomération lyonnaise, 2014)

Ces alluvions se caractérisent par une granulométrie très étalée, dont la distribution s'étend du galet décimétrique au sable fin. Baignant dans la nappe d'accompagnement du Rhône, les alluvions présentent une perméabilité très élevée ($k = 1.10^{-3} \text{ m.s}^{-1}$). Localement une redistribution de la granulométrie est observée, avec des passages parfois très sableux (banc de sables fins) ou au contraire des franges très graveleuses (galets délavés).

Le substratum molassique du Miocène local s'apparente à des sables jaunâtres plus ou moins grésifiés et très compacts. D'un point de vue hydrogéologique, cet horizon présente des perméabilités nettement plus faibles que les alluvions du Rhône (en moyenne $k = 5.10^{-5} \text{ m.s}^{-1}$).

On notera que la nappe d'accompagnement du Rhône est relativement proche de la surface dans le secteur de la Part-Dieu, à seulement 5 m de profondeur. Du fait de la forte

perméabilité des alluvions, cette contrainte limite les possibilités de tirantage de la fouille sous le niveau de nappe.

Bien que la fiche hydraulique des parois moulées sera ancrée dans la molasse du Miocène, la réalisation d'une fouille de cette superficie, sous une colonne d'eau d'environ 14 m de hauteur à rabattre, implique des débits de pompage de l'ordre de 1000 m³/heure pour les phases de terrassement les plus critiques.

2. Dimensionnement des parois moulées

Afin de reprendre les charges des ouvrages avoisinants et de limiter autant que possible les déformations induites sur les ouvrages SNCF, un soutènement suffisamment rigide devait être mise en œuvre. La conception du parking s'est orientée classiquement – comme c'est le cas de nombreuses excavations profondes en région lyonnaise – vers une enceinte périphérique en paroi moulée, ancré dans cet horizon moins perméable afin de limiter les débits de pompage. Les parois ont une épaisseur de 80 cm et une hauteur de 30 m environ.

Le dimensionnement a été mené par une approche combinant des modèles aux coefficients de réaction (K-Rea), principalement utilisés pour les vérifications de ferrailage, et des modèles éléments finis (Plaxis), ces derniers étant indispensables pour déterminer les déformations à l'arrière des soutènements. Des calages préalables ont été réalisés sur des modèles simplifiés pour vérifier que les deux approches donnaient des résultats similaires en termes de déformations et d'efforts.

La prise en compte des gradients est une contrainte forte sur la conception : le contraste de perméabilité avec les alluvions fait que des pertes de charge vont se développer sur une faible hauteur, dans les molasses uniquement. L'augmentation du gradient hydraulique en pied de rideau conduit à une réduction de la butée et accentue donc les déformations du soutènement. La fiche mécanique doit donc être choisie à la fois vis-à-vis du respect des critères de butée mais aussi de déformations admissibles. Au droit de l'ouvrage PPB, le toit molassique peut varier jusqu'à 5 m selon la zone, ce qui implique des ajustements de la fiche mécanique du soutènement selon le niveau du toit de la molasse.

2.1. Paramètres de cisaillement

Dans l'objectif de limiter l'impact sur les ouvrages avoisinants durant les phases de terrassement, le choix des paramètres de cisaillement des terrains constitue à l'évidence une étape clé. Bien que la nature des terrains alluvionnaires soit essentiellement sablo-graveleuse, un critère de cohésion à court terme a été introduit dans les modèles. L'introduction de ce paramètre se justifie par la nature charpentée des alluvions du Rhône, mise en évidence :

- par la réalisation d'essais de cisaillement en grand (boîte de Casagrande de dimensions 0.6*0.6*0.4 m, étude de Bourdeau, 1997). Ces essais, qui permettent d'appréhender le comportement en grand des alluvions, ont indiqué une cohésion d'imbrication de l'ordre de 20 kPa.
- par des rétro-analyses des instrumentations de parois sur d'autres projets de fouille dans le bassin lyonnais, en particulier les études de recalage sur le métro D de Lyon (Zghondi, 2010), concluant à la considération d'une cohésion de 24.5 kPa.

Ces résultats et études démontrent la nécessité d'introduire une cohésion minimale de 20 kPa dans les calculs de soutènement aux coefficients de réactions hyperstatiques pour obtenir des déformées et efforts internes dans les parois cohérents avec les auscultations mises en place. En revanche, on notera qu'il convient de retenir une cohésion plus faible, de l'ordre de 10 kPa, dans une modélisation de type éléments finis, pour obtenir des déformées équivalentes. La raison est que les modélisations en éléments finis sont mieux à même de reproduire les phénomènes d'effet voûte entre éléments butonnants, qui

conduisent à une redistribution des efforts sur les appuis et ainsi à une limitation de poussée « en travée ».

2.2. Paramètres de déformabilité : lois de comportement en petites déformations

Pour l'évaluation des déformations induites sur les structures avoisinantes, des modèles aux éléments finis (MEF) ont été utilisés. Ces modèles sont plus précis pour reproduire l'état de contraintes actuel, déjà fortement impacté par les ouvrages existants (mur SNCF, TVM). Les lois de comportement classiques de type Mohr-Coulomb ont été jugées insuffisantes pour reproduire correctement le comportement en petites déformations des terrains à l'arrière des parois. Dans le cadre du projet PPB, l'emploi d'un modèle de comportement élastoplastique de type HSS (Hardening Soil Model Small Strains), tenant compte de la dégradation du module avec la déformation, a été retenu.

L'utilisation de cette loi nécessite la définition de paramètres de déformabilité à faible déformation en plus de ceux de la loi Hardening Soil Model (HSM), avec :

- G_0 : module de cisaillement à très petites déformations qui a été déterminé à partir d'essai cross-hole ;
- $\gamma_{0.7}$: taux de cisaillement pour lequel le module de déformation a été réduit de 70% par rapport au module à déformation nulle. Celui-ci a été déterminé sur la base de la littérature (Darendelli, Ishibashi et Zang et Electric Power Research Institute (California)), en menant une approche conservative avec un paramètre $\gamma_{0.7}$ situé dans la fourchette basse.

La validation de la loi de comportement HSS a été menée avec l'étude d'un cas de soutènement simplifié (i.e. en négligeant la présence des ouvrages existants) pour lesquels les méthodes aux coefficients de réaction (MISS-K), sont dans leur parfait champ d'application. En superposant les courbes de déplacement de l'écran obtenues aux éléments finis avec les résultats de ceux obtenus avec un modèle aux coefficients de réaction (Figure 4), un calage satisfaisant est obtenu entre le modèle Plaxis HSS avec une cohésion de 10 kPa et le modèle MISS-K avec une cohésion de 20 kPa.

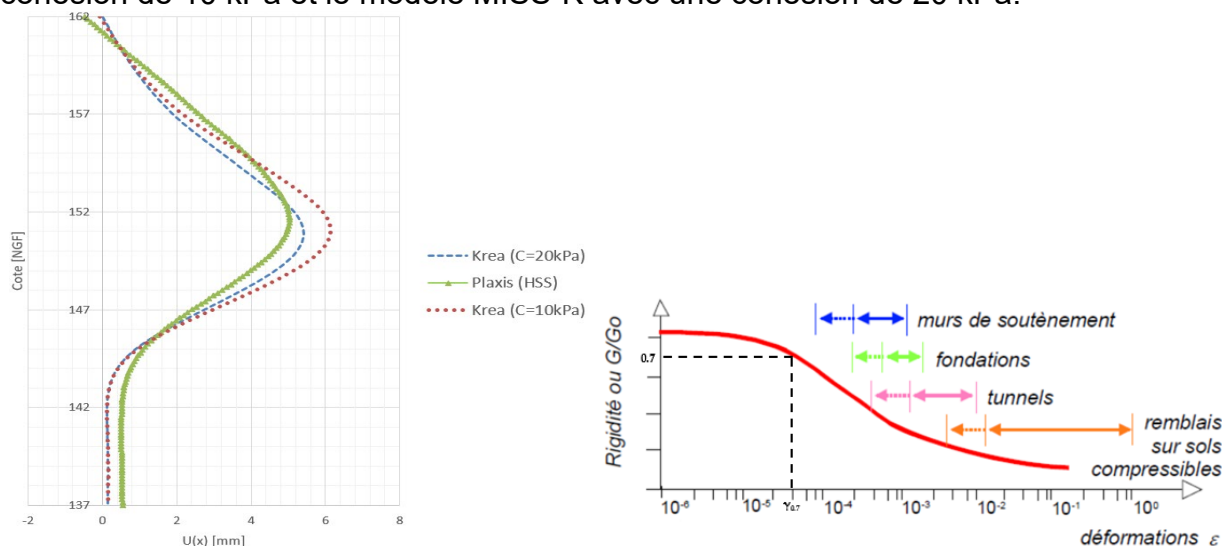


Figure 4a (gauche) : Déformations des soutènements - Plaxis HSS vs modèle MISS-K

Figure 5b (droite) : Variation du module de déformation avec la déformation (Reiffsteck, 2002)

2.3. Prise en compte des déformations de retrait/ fluage

2.3.1. Retrait et fluage des éléments butonnants

L'impossibilité de réaliser des bandes de clavage sur des poutres et dalles implique de prendre en compte les déformations des planchers liés aux phénomènes de fluage et retrait

du béton dans la conception des soutènements. Au vu de la longueur des éléments butonnants, ces phénomènes constituent un facteur aggravant les déformations des soutènements.

Dans le modèle, la prise en compte des déformations des éléments horizontaux liées aux phénomènes de fluage et de retrait a été fait par le biais d'une évolution des raideurs des appuis (voir Figure 5). Concrètement une fois l'élément structural chargé à une contrainte σ_1 , des déformations de fluage ont lieu jusqu'à l'état de déformation ε_2 . Une fois l'équilibre trouvé on peut déduire un module d'élasticité sécant correspondant au module de fluage ou de retrait.

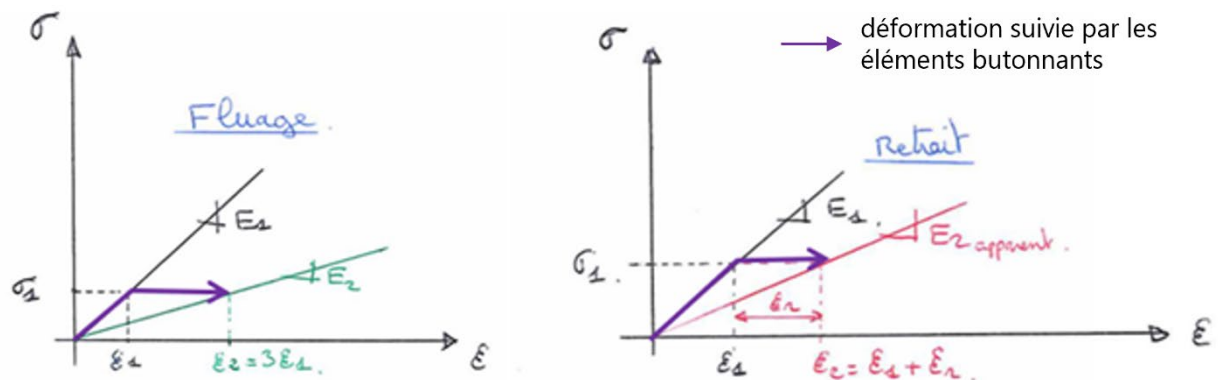


Figure 6. Déduction des modules sécants de fluage et de retrait

Dans le modèle aux éléments finis, la modification des raideurs sous chargement constant ne permet pas de mener le calcul. Pour y remédier, chaque niveau butonnant a été démultiplié en 3 éléments de barres rapprochées pour tenir compte de la variation de raideur des planchers avec :

- A court terme : $E_{\text{béton-CT}}$ module d'Young de l'élément butonnant (avant fluage) et activation des 3 barres ;
- A moyen terme : $E_{\text{béton-LT}}$ module apparent de l'élément butonnant après fluage et avant les déformations de retrait avec 2 barres actives ;
- A très long terme : $E_{\text{béton-retrait}}$ module apparent de l'élément butonnant après fluage et après les déformations de retrait, avec seulement 1 barre active.

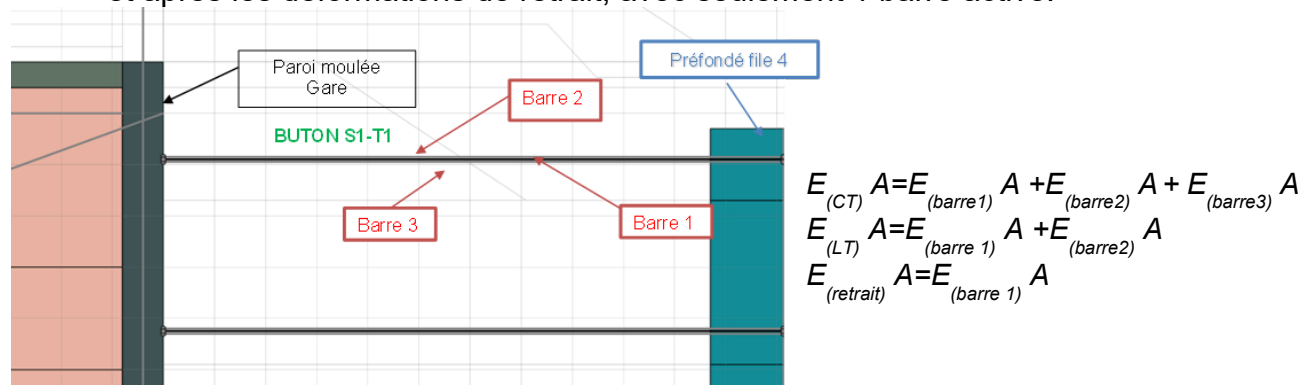


Figure 7. Variation de raideur des planchers modélisés par 3 éléments barres

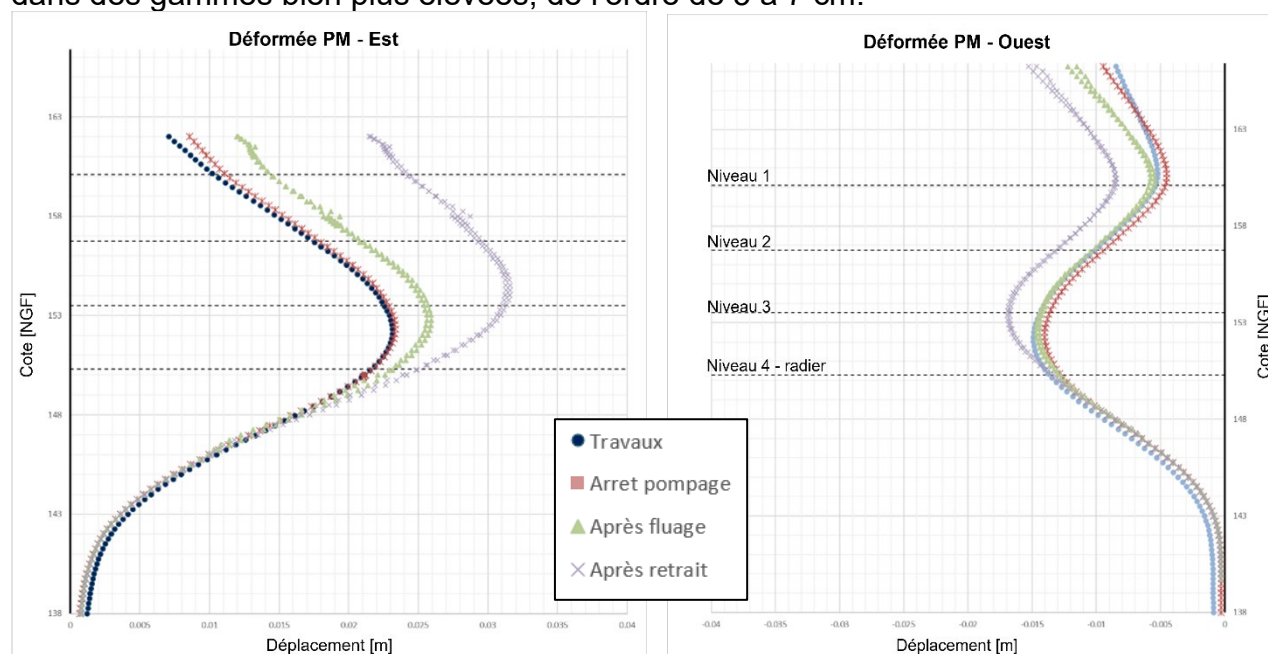
2.3.2. Fluage des éléments verticaux

Dans le modèle éléments finis, de manière à prendre en compte des effets du fluage dans ces éléments verticaux, les parois moulées ainsi que les barrettes de fondation de l'ouvrage ont été modélisées par le biais d'éléments volumique reprenant la géométrie réelle des ouvrages ramenés dans le plan de coupe associés à des éléments plaque positionnés à la fibre neutre de l'élément volumique.

L'objectif d'associer deux éléments pour un objet est de prendre en compte l'effet de fluage du béton à long terme par désactivation de l'élément plaque ; les propriétés étant alors définies pour que les éléments volumiques apportent à eux seuls la rigidité long terme des matériaux (i.e. avant fluage), et la plaque le complément de rigidité.

2.4. Mise en œuvre des calculs aux éléments finis

Les résultats en déformation horizontale issus de la modélisation aux éléments finis sont présentés Figure 7. Les différentes approches décrites dans les paragraphes précédents ont permis de limiter les déformations attendues entre 2 et 3 cm pour les zones les plus critiques, ce qui a permis de respecter les critères du marché (< 3 cm). Par comparaison, l'utilisation de lois de comportements plus classiques, avec des déplacements liés aux effets du retrait imposés directement sur les parois, auraient induit des déformations horizontales dans des gammes bien plus élevées, de l'ordre de 5 à 7 cm.



3. Conception d'un radier ancré

3.1. Reprise des sous-pressions

Un des autres grands enjeux du projet concerne la reprise des sous-pressions par la structure, puisqu'une colonne d'environ 14 m de hauteur est à reprendre en phase définitive. Plusieurs parkings lyonnais sont dimensionnés avec un radier drainant. Dans le cadre du PPB, cette solution impliquerait un pompage en continu de 1000 m³/h durant toute la vie de l'ouvrage. Cette solution peu vertueuse et peu économique implique aussi des problématiques de rejet des volumes pompés. Compte tenu du fait que le parking est assimilable à une boîte vide, la solution de radier lesté et étanche a également été écartée puisque celui-ci aurait dû être épaissi à plus de 5 mètres pour être stable.

On notera que l'ensemble des charges de la structure du parking repose sur des barrettes de fondation qui reprennent aussi les efforts de sous-pression par frottement. L'objectif de la conception a été de faire participer un maillage de micropieux dans la reprise des efforts de sous-pression. Ce réseau d'ancrage permet d'augmenter la résistance à l'arrachement en allégeant les efforts de traction dans les barrettes, mais également de limiter la flèche et les efforts qui se développent dans le radier entre les barrettes. Sur l'ensemble du parking se sont près de 1000 micropieux longs de 25 mètres en moyenne qui seront liaisonnés au radier et ancrés dans la molasse.

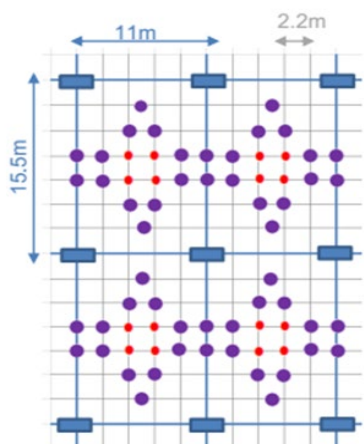


Figure 9. Maillage de micropieux

3.2. Détermination des raideurs

Pour déduire les raideurs des micropieux et barrettes et comprendre la répartition des efforts, une maille élémentaire 3D a été modélisée aux éléments finis. Cette modélisation permet de tenir compte des interactions entre les éléments de fondations puisque lorsque les barrettes se mettent en charge, le sol au voisinage de ces dernières entrera également en mouvement, allégeant la charge des micropieux. Pour arriver à cette modélisation, un calage des paramètres de résistance de cisaillement et des modules des sols a été nécessaire de manière à respecter au mieux les courbes de chargement en compression et en traction de micropieu et de barrette isolés. Le calage des raideurs des différents éléments au sein d'un groupe a permis de définir une maille « optimisée » de micropieux.

4. Conclusion

Compte tenu des fortes contraintes imposées (notamment phasage top-and-down, présence de nombreux existants, limitation des déplacements sur les ouvrages SNCF, présence d'une nappe), la conception de l'ouvrage PPB a nécessité de combiner des méthodes d'interaction sol-structure relativement poussées, en particulier concernant le choix des lois de comportement et les calages des raideurs. Les méthodes présentées ont permis de respecter les critères de déformation tout en optimisant l'ouvrage.

5. Références bibliographiques

- Benz, T. Small-strain stiffness of soils and its numerical consequences. Phd, Universitat Stuttgart, 2007
- Bourdeau Y., (1997). Le comportement des alluvions du Rhône dans une grande boîte de cisaillement direct. Revue Française de Géotechnique vol 79.
- Coudert J., Nicolas J., Amraoui N., Seguin J.J., 2007 – Rapport BRGM : Connaissance hydrogéologique du sous-sol de l'agglomération lyonnaise, 2007.
- DongSoon P., Tadahiro K., (2018). Shear modulus reduction and damping ratio curves for earth core materials of dams. Canadian Geotechnical Journal, vol. 56, pp 14-22.
- Ishibashi I., (1993). Unified dynamic shear moduli and damping ratios of sand and clay. Soils and foundation, vol. 33.
- Mongereau N., Sanglerat G. (2002). Pathologie de parkings enterrés sous la nappe à Lyon. Revue Française de Géotechnique vol 101.
- Schanz T., Vermeer P.A., Bonnier, B.G. (1999) The hardening soil model : formulation and verification. Beyond 2000 in Computational Geotechnics, Rotterdam, pp 281- 290
- Zghondi J., (2010). Modélisation avancée des excavations multi-suppportées en site urbain, thèse soutenue à l'INSA de Lyon.