

Titre :**Gonflement sous radier et PM sous lignes HT de la L14 Sud**

Auteurs : Pierre XEMARD, Ingénieur étude, GEOS – Agnès SAGNIERE, Ingénieur géotechnicienne, RAZEL-BEC – Thomas NOVALES, Ingénieur géotechnicien, RAZEL-BEC

Chapô :

Des solutions techniques innovantes ont été proposées, justifiées et mises en œuvre avec succès pour optimiser les conditions de réalisation du chantier des 4,1 km de tunnel, trois stations et trois ouvrages annexes du lot GC03 de la L14 Sud: coffrages modulus pour les vides sanitaires sous radier, mini-benne et cages d'armatures manchonnées pour les parois moulées situées sous les lignes électriques à haute tension.

Texte :**1. Présentation générale**

Le prolongement de la ligne 14 Sud de la RATP, en cours de creusement, s'étend des portes de Paris (gare de Maison Blanche - Paris XIII) jusqu'à l'aéroport d'Orly, et desservira 7 nouvelles gares réparties le long de 14 km de tunnel (figure 1). Cette ligne 100% automatique, dont la mise en service est prévue en 2024, transportera à terme un million de voyageurs par jour et sera l'une des plus empruntées d'Île-de-France.

Le lot GC03 comprend la réalisation de 3 gares et 3 ouvrages annexes ainsi que le creusement de 4,1 km de tunnel entre la commune de Thiais à proximité de l'aéroport d'Orly (gare Pont de Rungis) et la commune de L'Haÿ-les-Roses (figure 2).

Les trois gares (Pont de Rungis, Porte de Thiais et Chevilly Trois Communes) et un ouvrage annexe (Alouettes) sont excavés à l'abri de parois moulées, les deux ouvrages annexes restants (Petit Le Roy et Hochdorf) sont réalisés en méthode traditionnelle (cadres métalliques et béton projeté) couplée avec des injections d'étanchement pour minimiser les venues d'eau. Le tunnel est foré à l'aide d'un tunnelier à pression de terre, nommé Claire en hommage à Claire MEROUZE première femme pilote de chasse sur un Rafale. Les caractéristiques principales sont résumées dans le tableau A.

2. Contexte géotechnique et hydrogéologique

Le tracé s'inscrit dans le contexte géologique du « Bassin Parisien », vaste cuvette, apparue au cours du Carbonifère et du Permien, dans laquelle se sont accumulées, au Mésozoïque et au Cénozoïque, des roches sédimentaires d'origines marine, lacustre, lagunaire ou fluviale sur environ 3 000 m d'épaisseur. À partir du Miocène le réseau hydrographique actuel se met en place. Des soulèvements d'origine tectonique et l'érosion ont alors conduit à la mise à jour des formations les plus anciennes en périphérie du bassin tandis que subsistent au centre des formations plus récentes.

Le tronçon est couvert par les cartes géologiques au 1/50000e de Corbeil-Essonnes et de Paris (figure 4). Les principales formations présentes le long du tracé du tunnelier sont des terrains sédimentaires de l'Oligocène à l'Éocène supérieur.

Les campagnes d'investigations géotechniques successives ont permis d'identifier la série lithostratigraphique type rencontrée le long du tracé (figure 5) :

- Remblais (RB) : matériaux hétérogènes, de consistance sableuse, localement avec des cailloux de taille variable ;
- Limons des Plateaux (LP) : formation meuble de nature hétérogène et souvent remaniée, principalement composée de limons, accompagnés localement de cailloutis siliceux ;

- Calcaires de Brie et de Sannois (TB) : succession de lits marno-calcaires blanchâtre, incluant localement des cailloutis calcaireux et siliceux de taille décimétrique ;
- Argile verte de Romainville et Glaises à Cyrènes (GV) : argiles principalement constituées d'illite et de smectites, caractérisées par leur vert intense. Elles sont compactes, très plastiques et potentiellement gonflantes ;
- Marnes de Pantin (MP) : marnes blanches au sein desquelles le développement d'une pression d'eau est possible malgré la portion argileuse et les faibles perméabilités retenues qui minimisent la possibilité d'une circulation d'eau ;
- Marnes d'Argenteuil (MA) : marnes argileuses comprenant des bancs successifs de marnes bleues (ou brunes) feuilletées, compactes. La base de cet horizon est caractérisée par la présence de gypse saccharoïde. Leur forte teneur en argile les rend potentiellement gonflantes.
- Marnes et Masses du Gypse (MFL) : faciès gypseux qui comprend trois masses de gypse séparées par deux assises marneuses, qui n'ont pas pu être distinguées clairement le long du tracé.

Les nappes en présence sont les suivantes :

- Nappe du Calcaire de Brie (Oligocène, TB) : présente tout le long du tracé, en circulation vers le sud, caractérisée par une perméabilité de fracture amplifiée par la dissolution des Calcaires d'autant plus développée que la formation a subi des percolations et infiltrations d'eaux de surface. Sous recouvrement, elle est alimentée latéralement et par percolation des eaux au travers des formations superficielles. Les parties marneuses sont en revanche peu perméables.
- Nappes de l'Éocène supérieur et moyen :
 - o Marnes de Pantin (MP) : aquitard de faible perméabilité reposant sur les Marnes d'Argenteuil, alimenté par la percolation des eaux à travers l'Argile verte très peu perméable. Cette faible recharge explique la saturation partielle de la formation, avec un niveau piézométrique généralement inférieur à la cote du toit.
 - o Masses et Marnes du Gypse (MFL) : il s'agit de circulations d'eau dans la porosité de fracture et de dissolution de la partie rocheuse des Masses et Marnes du Gypse datées du Ludien. Les modes d'alimentation de la nappe (percolation des eaux à travers des Marnes d'Argenteuil, alimentation latérale), sa relation avec les formations aquifères sous-jacentes comme le Calcaire de St Ouen et ses exutoires sont globalement mal connus.

3. Traitement du gonflement sous radier

Les radiers des gares Pont-de-Rungis (PDR), Porte-de-Thiais (PDT) et Chevilly-Trois-Communes (C3C) reposent sur les Marnes d'Argenteuil qui ont été qualifiées par le Maître d'œuvre comme présentant un potentiel de gonflement élevé. La conception prévoit la mise en œuvre d'un vide sanitaire de 50 cm d'épaisseur.

3.1. Phénomène de gonflement des argiles

Les conditions simultanées à réunir pour voir se développer le phénomène de gonflement des terrains argileux sont les suivantes :

- Modification de l'état de contrainte – déchargement lié au terrassement ;
- Modifications des conditions hydriques – apport d'eau ;
- Une contrainte effective σ'_v inférieure à la pression de gonflement.

Une fois ces conditions réunies, les effets du gonflement dépendent des possibilités du matériau à se déformer. Si les déformations sont libres, alors il y a une augmentation du volume. Si les déformations sont bloquées, le gonflement se traduira par l'application d'une pression sur la surface qui s'oppose à sa déformation.

Pour les trois stations, les parois moulées sont ancrées dans les Marnes et Masses du Gypse et isolent les Marnes d'Argenteuil de la nappe superficielle des Calcaires de Brie (figure 6).

Sur le long terme, le relâchement des contraintes peut être un facteur susceptible d'initier une modification de la structure de l'argile et entraîner un gonflement par hydratation (phénomène de succion et d'imbibition de l'argile avec augmentation de la porosité et de la teneur en eau).

3.2. Caractère gonflant des Marnes d'Argenteuil

Lors des études de conception, les paramètres d'identification mesurés par essais en laboratoire ont mis en évidence le comportement gonflant des Marnes d'Argenteuil, avec un indice de plasticité élevé ($I_p > 30$) et une forte argilosité (VBS proche de 6 et passant à 80 μm supérieur à 90%). Ce caractère gonflant a été confirmé par les essais de gonflement spécifiques à l'œdomètre et selon la méthode de Huder-Amberg.

Après élimination des valeurs issues d'essais douteux, probablement réalisés sur des matériaux décomprimés, les paramètres de gonflement moyens suivants ont été retenus : rapport de gonflement $R_G = 0,03$ et pression de gonflement $\sigma_G = 300$ kPa (figure 7). En considérant l'épaisseur de Marnes d'Argenteuil sous le fond de fouille, les calculs conduisent aux résultats suivants :

- Pression de 300 kPa pour un gonflement totalement bloqué ;
- Déplacement vertical de 30 cm pour un gonflement totalement libre ;
- Pression résiduelle de 0 kPa pour un vide de 50 cm.

3.3. Solution vide sanitaire modulo

La conception des gares prévoit un vide sanitaire de 50 cm, que le Groupement a mis en œuvre avec un coffrage perdu de type « Modulo ». Il s'agit d'éléments en matière plastique appuyés sur le fond de fouille par des pieds, permettant de ménager un vide entre le fond de fouille et le radier. La surface d'appui au sol des éléments est de 10% de la surface totale.

Par sécurité, le ferrailage des radiers a été dimensionné pour une sous-pression uniforme de 30 kPa, qui prend en compte à la fois la pression résiduelle de gonflement des terrains sous le radier après gonflement libre sur 50 cm, et la charge apportée par la surface d'appui. La solution de vide sanitaire sur « Modulo » a ainsi permis de diviser d'un facteur 10 la sous-pression sous le radier, et réduire de manière efficace son ferrailage.

Cette solution a été privilégiée à d'autres méthodes de coffrage, polystyrène ou carton notamment, pour son coût réduit et sa facilité de mise en œuvre.

3.4. Méthode de mise en œuvre et difficultés rencontrées

La mise en œuvre des modulus est simple (figure 8) : il suffit de les emboîter les uns aux autres sur une surface donnée. Les modules de coffrage n'étant pas symétriques, ils sont marqués d'une flèche pour indiquer le sens d'assemblage à respecter. Une fois l'ensemble des modules posé, un treillis soudé est mis en œuvre puis le béton est coulé et vibré. Le système de coffrage perdu par modulo permet ainsi d'obtenir un vide sanitaire sous une chape de béton munie de potelets, qui constituent une assise suffisamment résistante pour permettre le ferrailage et le coulage du radier dont l'épaisseur dépasse parfois 1,5 m.

Pour éviter les découpages et épouser la surface à recouvrir, des fermetures continues sont placées aux extrémités. Il s'agit de modules secondaires qui se glissent sous les modules principaux afin de pouvoir varier la distance jusqu'aux soutènements et refermer le coffrage. Avant la pose du treillis, les modules sont relativement vulnérables et des casses peuvent survenir, il convient donc d'éviter les passages intempestifs sur les modules.

Pour la gare Pont de Rungis, les modulus ont été posés en période humide (de janvier à mars) sans mettre en péril la mise en œuvre ou ralentir la cadence de pose, ce qui n'aurait pas été possible avec des coffrages perdus en carton, beaucoup plus sensibles à l'eau.

4. Gare PDT – réalisation de parois moulées sous lignes à haute tension

Un des risques principaux du chantier de la gare Porte de Thiais est l'électrocution ou l'amorçage des lignes RTE, présentes et couvrant la moitié de l'emprise. Il s'agit de lignes à très haute tension (225 000 V) qui assurent l'alimentation électrique de la plateforme aéroportuaire d'Orly. Une solution technique et matérielle adaptée à cette contrainte a dû être déployée pour réaliser les parois moulées de 1,2 m à 1,5 m d'épaisseur jusqu'à 36 m de profondeur dans les meilleures conditions de sécurité.

Un plafond artificiel a été fixé à 8 m au-dessus du terrain naturel, grâce à un système LIDAR (Light Detection And Ranging) qui émet une alerte sonore en cas de franchissement de ce seuil.

Les outils de forage classiques ont été adaptés à l'enjeu : la mini-benne de forage ne fait que 3 m de haut et la flèche de la foreuse ne peut dépasser 6,70 m de haut (figure 9). Les palplanches et les cages d'armatures réduites en éléments de 3 m de long sont manutentionnées par une grue spécifique, dont la hauteur de travail maximale est rentrée électroniquement par l'opérateur pour répondre aux exigences du site et à la hauteur à ne jamais dépasser. Ces adaptations des machines ont permis d'écarter le facteur « risque humain » et de réaliser les parois moulées dans les meilleures conditions de sécurité.

Le ferrailage des parois a également été adapté à ces conditions particulières. La hauteur des éléments étant limitée à 3 m, des cages d'armatures manchonnées ont été privilégiées à une mise en œuvre classique avec recouvrement (figures 10a et b).

De même, de façon usuelle, des coupleurs sont placés dans les cages de parois moulées afin d'ancrer les dalles aux parois. L'architecture spécifique de la future station amène un cas peu ordinaire où un pan de paroi moulée sert de voile définitif entre les niveaux « accueil » et « dalle de couverture ». La dalle niveau accueil vient ainsi faire le tour de la paroi, ce qui impose la mise en place de barres doublement manchonnées dans certaines cages des parois moulées. Les armatures de la dalle seront ainsi connectées via cette barre double manchonnée à travers la paroi moulée. Cette technique présente des avantages structurels, économiques et sécuritaires par rapport à la réalisation de scellements.

5. Gare PDR – retour d'expérience des mesures de déplacements

Les mesures d'auscultation récoltées au cours de la construction de la première station du lot (Pont de Rungis) ont été exploitées et confrontées aux résultats théoriques. Cet exercice de rétroanalyse a permis de confirmer et fiabiliser les hypothèses de calcul retenues pour les trois stations du lot qui se situent dans un contexte géotechnique très similaire.

5.1. Instrumentation de la station PDR

Afin de surveiller le comportement de la gare et des avoisinants, un important dispositif d'auscultation a été mis en place au niveau de la station Pont de Rungis (figure 11), consistant notamment en :

- 10 inclinomètres automatisés installés dans les parois moulées ;
- 23 triplets d'extensomètres installés sur les butons – la mise en place de 3 extensomètres à 120° permet de s'affranchir des efforts parasites ;
- 22 couples d'extensomètres noyés dans le béton du radier et de chaque dalle – 1 couple en intrados et 1 couple en extrados ;
- 68 cibles d'auscultation installées sur les parois à l'avancement des terrassements – elles sont positionnées au niveau des inclinomètres afin de fiabiliser les mesures ;
- 8 piézomètres.

Ce dispositif est densifié au niveau du tympan nord pour tenir compte de l'interaction avec la gare RER existante.

5.2. Des calculs théoriques sécuritaires

Le dimensionnement des parois moulées butonnées a été réalisé par des calculs aux coefficients de réaction à l'aide du logiciel Rido, qui fournit la déformée de la paroi et les efforts dans les appuis provisoires et définitifs. Les déformations induites à l'arrière de la paroi sur le bâti avoisinant sont ensuite vérifiées par calculs aux éléments finis.

Le calcul de dimensionnement a été réalisé en considérant des paramètres non drainés (cohésion non drainée c_u) dans les terrains à dominante argileuse jusqu'à la réalisation du radier, et vérifié avec des paramètres drainés (cohésion et angle de frottement effectifs c' et φ').

Un premier calcul a été réalisé avec le jeu de paramètres issus du cahier B, déterminé à partir des méthodes statistiques recommandées dans les Eurocodes. Les données complémentaires issues de la campagne de reconnaissance réalisée dans le cadre de la mission d'exécution G3 ont ensuite permis de réévaluer à la hausse certaines caractéristiques géotechniques.

Les rétro-calculs ont fourni deux enseignements intéressants dans le cas de la gare Pont de Rungis :

- Les caractéristiques géotechniques initialement retenues dans le cahier B se sont révélées sécuritaires, déplacements calculés avec un déplacement maximum en ventre supérieur de 35% à celui mesuré sur site (figure 12). La prise en compte des caractéristiques pressiométriques améliorées issues de la campagne de reconnaissances G3 dans les rétro-calculs montre une cohérence entre les déplacements calculés et les déplacements mesurés.
- L'allure et l'amplitude de la déformée mesurée confirment le comportement non drainé des matériaux argileux pendant la durée des travaux (10 mois), ce qui est cohérent avec les retours d'expérience disponibles dans ce type de terrain.

Résumé

Des solutions techniques innovantes ont été déployées sur le lot GC03 de la L14 Sud. Pour les vides sanitaires sous radiers ancrés dans les Marnes d'Argenteuil, des coffrages de type modulo ont été privilégiés pour leur coût réduit et leur facilité de mise en œuvre. La réalisation des parois moulées de la gare Porte-de-Thiais sous hauteur limitée a nécessité une adaptation du matériel et des procédures de construction. Une grue à flèche courte (6,70 m de hauteur) équipée d'une mini-benne a été utilisée et les cages d'armatures ont été réduites en éléments de 3 m de longueur manchonnés. Ces dispositions, justifiées et mises en œuvre avec succès, ont permis d'optimiser les conditions de réalisation du chantier.

Encadré des principales quantités :

Tunnel	4,1 km Tunnelier à pression de terre
3 gares : Pont de Rungis M.I.N. Porte de Thiais Chevilly-Trois-Communes	18 à 26 m x 120 m x 27 m (fond de fouille) Parois moulées de 1,2 à 1,5 m d'épaisseur ancrées à 37 m
3 ouvrages annexes : Alouettes (ALO) Hochdorf (HOC) Petit-le-Roy (PLR)	ALO : enceinte en paroi moulée avec un puits circulaire de 8,7 m de diamètre et 30,8 m de profondeur HOC et PLR : puits rectangulaires de 20 et 33 m de profondeur, excavés en méthode traditionnelle

Encadré des principaux intervenants :

Maîtrise d'ouvrage : RATP / Société du Grand Paris
Maîtrise d'œuvre : ELIOS : Setec tpi / Systra
Groupement d'entreprises : Razel-Bec (Mandataire) / Eiffage Génie-Civil / Sefi-Intrafor
EXE géotechniques (mission G3) : GEOS Ingénieurs Conseils

Liste des figures et copyright :

Figure 1 : Synoptique du prolongement de la ligne 14 de la RATP au sud de Paris, copyright RATP
Figure 2 : Vue en plan et profil en long géologique du lot GC03, copyright RAZEL-BEC
Tableau A : Chiffres-clés, copyright RATP
Figure 4 : Extrait de la carte géologique harmonisé au 1/50000e (BRGM), copyright BRGM
Figure 5 : Coupe stratigraphique type au niveau du plateau d'Orly (BRGM), copyright BRGM
Figure 6 : Coupe et profil hydrostatique au niveau de la station Porte-de-Thiais, copyright SEFI-INTRAFOR & GEOS
Figure 7 : Courbes de gonflement des Marnes d'Argenteuil en laboratoire, copyright GEOS
Figure 8 : Mise en œuvre des éléments de coffrage « modulus », copyright RAZEL-BEC
Figure 9 : Utilisation d'une mini-benne sous les lignes à haute tension, copyright RAZEL-BEC
Figure 10a&10b : Cages d'armature manchonnées mises en œuvre en éléments de 3 m de hauteur au niveau de la gare Porte de Thiais, copyright RAZEL-BEC & SEFI-INTRAFOR
Figure 11 : Plan d'implantation des auscultations de la boîte gare Pont de Rungis, copyright RAZEL-BEC
Figure 12 : Superposition des déformées théoriques et mesurées pour une paroi moulée de la gare Pont de Rungis, copyright RAZEL-BEC