

# Travaux souterrains en sols et roches

---

Ce document vise à étudier le projet de tramway Châtillon - Viroflay (78) et plus particulièrement la section souterraine s'étendant de la forêt de Meudon jusqu'à la ville de Viroflay en passant par Vélizy. Le projet est rendu difficile par un profil géologique varié avec de nombreuses couches de faibles épaisseurs typiques du bassin parisien. La maîtrise d'œuvre est assurée par le groupe EGIS Rail - Pierre SCHALL. L'environnement, la géotechnique et l'hydrologie du site seront analysés afin de proposer un mode de creusement adapté. Une attention particulière sera portée sur l'argumentation de la solution retenue sur le plan technique après identification des risques associés et de leurs conséquences sur le projet.

## 1. Définition du mode de creusement de la portion souterraine

On cherche tout d'abord à définir la méthode de creusement la plus adaptée pour ce projet. Pour cela, deux critères principaux sont à prendre en compte : d'une part, la sensibilité du terrain ou de son environnement doit permettre de réaliser les opérations de construction avec un niveau de risque suffisamment faible pour garantir la sécurité des personnes et des biens alentours ; d'autre part, des arguments économiques, des exigences de délais de réalisation ou de conditions techniques particulières sont à prendre en compte.

- la sécurité des personnes et des biens : le creusement du tunnel SNCF de Meudon constitue une référence puisque sa tête Ouest n'est située qu'à 1,5 km à l'Est du projet de tramway. Il a été exécuté par méthode conventionnelle. Les travaux ont été marqués par un accident géologique : il s'est produit un débouffage de Sables de Fontainebleau saturés, entraînant ainsi les Marnes à Huîtres qui ont entièrement envahi le tunnel sur une longueur de 40 m. En s'appuyant sur ce retour d'expérience le creusement au tunnelier apparaît comme plus sécuritaire que la méthode conventionnelle.

Pour les tunnels peu profonds (ici, le rapport entre la hauteur de couverture et le diamètre du tunnel est compris entre 2 et 3) creusés dans des formations meubles, comme c'est le cas ici, la maîtrise des tassements est primordiale lors de la traversée des zones urbaines où le moindre tassement différentiel peut entraîner des désordres dans les bâtiments sus-jacents<sup>1</sup>.

Ici, la cuvette de tassement caractérisée par sa demi-largeur  $L_C = 2,5i$  (avec  $i$  tassement au centre de la cuvette), est donnée en première approximation de Rankin par  $i = 0,5H$ . ( $H$  désigne ici la hauteur entre la surface du terrain et le centre du tunnel que l'on prendra en moyenne égale à 15 m). Il vient alors que  $i = 7,5 m$  et par conséquent  $L_C = 18,75 m$ . La cuvette de tassement est donc importante, de nombreux bâtiments pourraient être impactés en surface.

Ainsi, le creusement par la méthode conventionnelle nécessiterait pour maîtriser ces tassements, la mise en place de pré-soutènements et soutènements importants pour limiter au maximum les tassements. L'usage d'un tunnelier présente le gros avantage de pouvoir mieux maîtriser les tassements.

On notera que pour la méthode conventionnelle, l'emploi d'explosifs en zone urbaine peut générer des nuisances importantes (vibrations notamment) ; les explosifs sont donc à proscrire.

---

<sup>1</sup> <http://csidoc.insa-lyon.fr/these/1999/dias/p47-202.pdf>

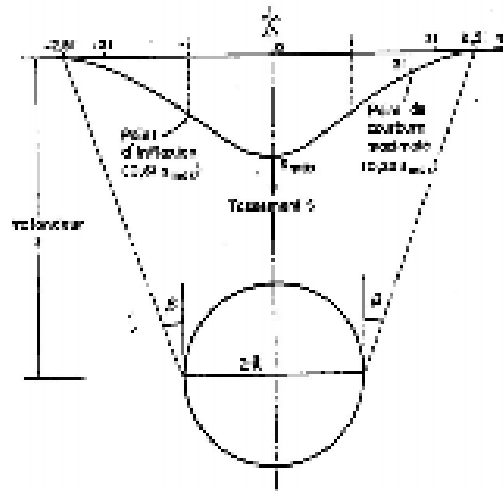


Figure 1 - Distribution transversale des tassements (Schlosser [1985])

- les coûts et les délais : pour les ouvrages les plus courts (< 1 km), la méthode conventionnelle reste la plupart du temps la plus compétitive aussi bien en termes de coûts de construction que de délais de réalisation. Pour les ouvrages plus longs (> 3 km), le creusement au tunnelier s'avère généralement plus compétitif. Ici, la portion souterraine considérée est longue de 1,6 km : le creusement au tunnelier et le creusement par méthode conventionnelle sont donc des solutions concurrentes financièrement. Cependant, en méthode conventionnelle, les caractéristiques des sols, résistance à la compression très faible ( $R_c < 0,5$  MPa) et sols parfois situés sous une nappe, correspondraient à un profil P7, P8, P9, P10 ou P11. Cela nous obligerait à utiliser soit la méthode d'enfilage, soit des contre-voûtes ou encore des voûtes parapluies, pour limiter les tassements ; ces méthodes présentent un coût important.

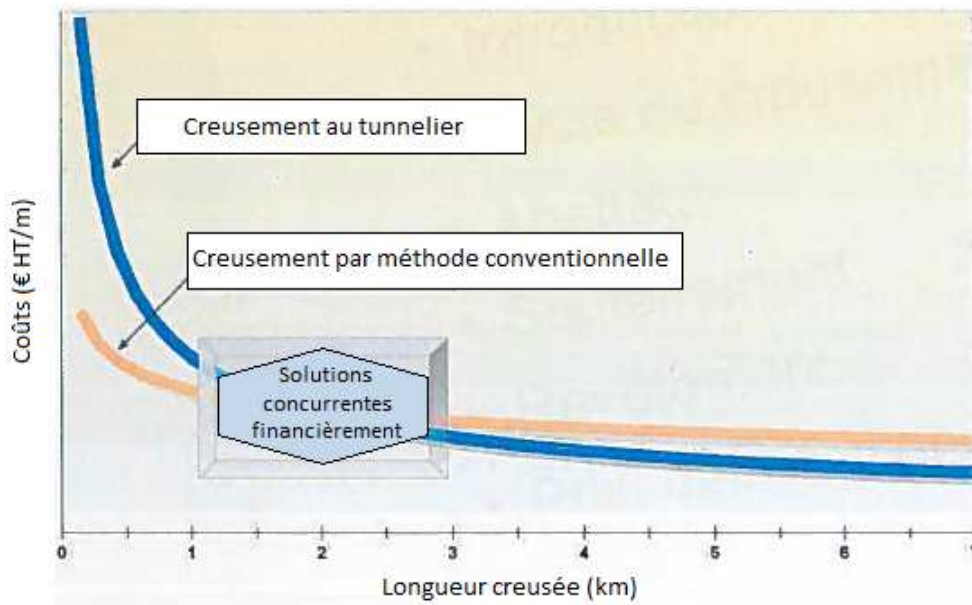


Figure 2 - Compétitivité des solutions en fonction de la longueur du tunnel<sup>2</sup>

Ainsi, la méthode au tunnelier à front pressurisé apparaît mieux adaptée que la méthode conventionnelle pour ce projet.

<sup>2</sup> Cours TSSR (ENTPE) – Denis Branque

## 2. Identification des risques associés et de leurs conséquences sur le projet

Dans cette partie, nous étudierons pour deux modes de confinement, pression de terre et pression de boue, les risques associés et les conséquences sur le projet. Le retour d'expérience sur le tunnel de l'A86 sous Versailles, qui sert de référence au projet, nous renseigne sur les difficultés rencontrées.

La quantité importante de matériaux fins présents dans les sols argileux constitue un risque qui peut conduire au colmatage de la roue du tunnelier et au collage des outils. Pour les marnes et les calcaires, le risque principal est la présence de karst possible dans le terrain. Cela pourrait engendrer des difficultés au niveau du maintien de la pression au front, une surconsommation de mortier autour des voussoirs, et de boue dans le cas d'un confinement à pression de boue, ainsi que l'absence de butée des voussoirs.

Par ailleurs, des difficultés peuvent être rencontrées au niveau des fronts mixtes :

- colmatage de la roue pour un confinement à pression de boue dû au collage de l'argile (malgré l'emploi d'additifs) et à la séparation du mélange argile-bentonite.
- difficulté du confinement à pression de terre à garantir le remplissage complet de la chambre de coupe à l'interface Sables de Fontainebleau/Marnes à Huîtres.

Le tableau suivant détaille les principaux risques que peut rencontrer un tunnelier à pression de terre ou à pression de boue et les mesures pour éviter ces risques.

Tableau 1 - Risques et conséquences en terrain meuble

| Risques  | Conséquences   |  |
|--|--|--|
|  | Pression de Terre  | Pression de Boue   |
| Sol abrasif                                    | Usure des outils, de la vis, changement d'outils, interventions au front, baisse de cadence<br><u>Mesures</u> : garnissage des outils, ajout d'additifs (mousse)   | Usure des outils et de la conduite de marinage, changement d'outils, interventions au front, baisse de cadence<br><u>Mesures</u> : garnissage des outils, retournement des conduites, matériel de remplacement à disposition   |
| Blocs indurés (boulders, lentilles gréseuses)  | Blocage de la roue, difficulté de marinage, usure et casse des outils, baisse de la cadence<br><u>Mesures</u> : barres à griffes en travers des ouvertures, molettes supplémentaires, interventions au front | Blocage du système de marinage, blocage de la roue, usure et casse des outils, baisse de cadence<br><u>Mesures</u> : concasseur de blocs, molettes supplémentaires, intervention hyperbare au front  |
| Forte perméabilité                             | Venue d'eau par la vis, rupture de front par renard, boulangerie dans le cas des sables<br><u>Mesures</u> : ajout d'additifs (mousse + polymère), injection de la zone concernée                             | Surconsommation de boue pour maintenir le confinement<br><u>Mesures</u> : tunnelier à pression de boue + air, formulation de boues à viscosité élevée (plus chargée en bentonite)  |
| Quantité importante de matériaux fins (argile) | Colmatage de la roue <sup>3</sup> , collage sur les outils<br><u>Mesures</u> : ajout d'additifs (mousse, polymère), jets haute pression, intervention au front pour nettoyage                                | Colmatage de la roue et des conduites, collage sur les outils, ralentissement des cadences de traitement de la boue<br><u>Mesures</u> : ajout d'adjuvants dispersant polymères), jets haute pression de bentonite, ajout d'éléments dans la centrale à boue pour traiter les fines |

<sup>3</sup> AFTES, CETU - Tunnel VL Est A 86 (Présentation et retour d'expérience)

|  |   |   |
|--|---|---|
| Cavité vide (karst) par dissolution de gypse ou calcaire | Difficulté d'ajustement de la pression au front, surconsommation de mortier autour des voussoirs, absence de butée des voussoirs<br><u>Mesures</u> : recherche de vides, comblement par injection de mortier  | Chute des pressions au front, tassement de surface, fontis, surconsommation de boue, surconsommation de mortier autour des voussoirs, absence de butée des voussoirs<br><u>Mesures</u> : recherche de vides, comblement par injection de mortier          |
| Traversée de bancs durs                                  | Variation abrupte de résistance, casse des molettes, vibrations perceptibles jusqu'en surface, baisse de cadence<br><u>Mesures</u> : pilotage adapté (maîtrise de la vitesse notamment à l'approche des calcaires de Saint-Ouen), remplacement de molette | Variation abrupte de résistance, casse des molettes, vibrations perceptibles jusqu'en surface, baisse de cadence<br><u>Mesures</u> : pilotage adapté (maîtrise de la vitesse notamment à l'approche des calcaires de Saint-Ouen), remplacement de molette |
| Diminution de la vitesse de creusement                   | Poussées appliquées sur la jupe ralentissent l'avancement du tunnelier<br><u>Mesures</u> : injection de bentonite pour réduire les poussées   | Poussées appliquées sur la jupe ralentissent l'avancement du tunnelier<br><u>Mesures</u> : injection de bentonite pour réduire les poussées   |

Le tableau suivant récapitule les principaux éléments et précise pour chaque risque au vu des observations réalisées sur la nature du terrain si la solution envisagée est très bien adaptée (++) , convenable (+) ou peu adaptée (-) à la situation rencontrée :

- les risques en vert ont une probabilité d'occurrence très faible ;
- les risques en vert clair ont une probabilité d'occurrence faible ;
- les risques en orange ont une probabilité d'occurrence élevée ;
- les risques en rouge sont les plus susceptibles d'être rencontrés au cours des travaux et les conséquences peuvent être fortement préjudiciables.

Tableau 2 - Risques pour les différents types de sols rencontrés

| Type de tunnelier       | Sol abrasif       |                  | Blocs indurés  |                  | Forte perméabilité (m/s) |      | Quantité importante de matériaux fins (%) |                  | Cavité vide par dissolution de gypse  |      | Front mixte   |                  |
|-------------------------|-------------------|------------------|--|------------------|--------------------------|------|---|------------------|---|------|---|------------------|
|                         | Pression de terre | Pression de boue | Pression de terre  | Pression de boue | Terre                    | Boue | Pression de terre                         | Pression de boue | Terre   | Boue | Pression de terre                                     | Pression de boue |
| Efficacité du tunnelier | +                 | ++               | ++   | +                | -                        | ++   | +   | -                | +   | -    | +   | +                |
| Marnes et Caillasses    | sol peu abrasif   |                  | pas de problème rencontré dans le tunnel de référence          |                  | 10 <sup>-6</sup>         |      | 78  |                  | risque très faible  |      | pas de problème rencontré dans le tunnel de référence |                  |
| Calcaire grossier       | sol peu abrasif   |                  | traversée facile des niveaux indurés dans tunnel de référence  |                  | 10 <sup>-5</sup>         |      | 29,5                                      |                  | risque important il y a eu un débouillage important sur le tunnel de Meudon |      | pas de problème rencontré dans le tunnel de référence |                  |
| Sables de Beauchamp     | sol peu abrasif   |                  | traversée facile lentilles grésifiées dans tunnel de référence |                  | 10 <sup>-5</sup>         |      | 54,3                                      |                  | risque très faible  |      | pas de problème rencontré dans le tunnel de référence |                  |
| Sables de Fontainebleau | sol peu abrasif   |                  | traversée facile lentilles grésifiées dans tunnel de référence |                  | 10 <sup>-5</sup>         |      | 36,05                                     |                  | risque très faible  |      | pas de problème rencontré dans le tunnel de référence |                  |

|                        |                 |   |                  |     |   |  |
|------------------------|-----------------|---|------------------|-----|---|--|
| Marnes supra-gypseuses | sol peu abrasif | pas de problème rencontré dans le tunnel de référence         | 10 <sup>-8</sup> | 99  | risque très faible  | pas de problème rencontré dans le tunnel de référence                                    |
| Calcaire de Saint-Ouen | sol peu abrasif | traversée facile des niveaux indurés dans tunnel de référence | 10 <sup>-7</sup> | 81  | risque important il y a eu un débouillage important sur le tunnel de Meudon | sur le tunnel de référence l'entrée trop rapide dans les calcaires a causé des problèmes |
| Argiles vertes         | sol peu abrasif | pas de problème rencontré dans le tunnel de référence         | 10 <sup>-7</sup> | 95  | risque très faible  | pas de problème rencontré dans le tunnel de référence                                    |
| Marnes à Huîtres       | sol peu abrasif | pas de problème rencontré dans le tunnel de référence         | 10 <sup>-6</sup> | 84  | risque très faible  | pas de problème rencontré dans le tunnel de référence                                    |
| Argiles de l'Yprésien  | sol peu abrasif | pas de problème rencontré dans le tunnel de référence         | 10 <sup>-9</sup> | 100 | risque très faible  | pas de problème rencontré dans le tunnel de référence                                    |

Le profil en long géotechnique nous indique que le tunnel passera près des horizons imperméables que sont les Argiles de l'Yprésien et les Argiles Vertes. Deux nappes étant situées au-dessus de ces horizons, il est donc possible qu'un écoulement vertical important se produise lorsque le tunnelier sera près de ces deux nappes. De plus, les calcaires grossiers situés sous la station Viroflay étant situés sous la nappe il est possible que le tunnelier rencontre des karsts remplis d'eau. Ces venues d'eau doivent donc être anticipées.

La solution retenue devra donc pouvoir gérer à la fois la rencontre avec des cavités vides, des terrains avec composés de beaucoup de particules fines et terrains avec perméabilités variant de 10<sup>-4</sup> à 10<sup>-9</sup>.

### 3. Argumentation du choix de la solution sur le plan technique

On cherchera ici à déterminer le mode de confinement le plus approprié au projet : pression de terre ou pression de boue. Pour ce faire, nous nous intéresserons plus particulièrement à la perméabilité des milieux, aux quantités de fines (< 80 µm) présentes dans le terrain et aux pressions hydrostatiques.

Tableau 3 - Propriétés des sols rencontrés sur le projet

| Sol                     | Perméabilité (m/s)                  | Pourcentage de fines | Pression hydrostatique (bars) | Confinement utilisé sur le cas de référence |
|-------------------------|-------------------------------------|----------------------|-------------------------------|---|
| Argiles de l'Yprésien   | 10 <sup>-9</sup>                    | 100                  | 0,85                          | Pression de Terre                           |
| Argiles Vertes          | 10 <sup>-9</sup>                    | 95                   | 0,65                          | Pression de Terre                           |
| Calcaires de Saint-Ouen | 10 <sup>-6</sup> - 10 <sup>-8</sup> | 81                   | 0                             | Pression de Terre                           |
| Calcaires Grossiers     | 10 <sup>-4</sup> - 10 <sup>-6</sup> | 29,5                 | 0,85                          | Air Comprimé                                |
| Marnes à Huîtres        | 10 <sup>-5</sup> - 10 <sup>-7</sup> | 84                   | 0,5                           | Pression de Terre                           |
| Marnes et Caillasses    | 10 <sup>-5</sup> - 10 <sup>-7</sup> | 78                   | 0,2                           | Air Comprimé                                |
| Marnes Supragypseuses   | 10 <sup>-7</sup> - 10 <sup>-9</sup> | 99                   | 0                             | Pression de Terre                           |
| Sables de Beauchamp     | 10 <sup>-4</sup> - 10 <sup>-6</sup> | 54,3                 | 0                             | Pression de Terre                           |
| Sables de Fontainebleau | 10 <sup>-4</sup> - 10 <sup>-6</sup> | 36,05                | 0,6                           | Pression de Boue                            |

Le tableau récapitulatif présenté ci-dessus permet de tirer les conclusions suivantes :

- les perméabilités rencontrées dans les différents horizons sont comprises entre  $10^{-9}$  m/s et  $10^{-5}$  m/s, allant ponctuellement jusqu'à  $10^{-4}$ . Ces valeurs indiquent une forte perméabilité des milieux pour lesquels un tunnelier à pression de terre semble adapté ( $k < 10^{-5}$  m/s). Le risque de rencontrer des discontinuités de perméabilité est par ailleurs défavorable au confinement à pression de boue<sup>4</sup>.
- la majorité des milieux traversés a une quantité de fines (diamètre inférieur à  $80 \mu\text{m}$ ) d'environ 80%. En se référant à la figure 3, il apparaît que la granulométrie de la plupart des terrains est adaptée à un confinement à pression de terre. Seules les strates de calcaires grossiers, des sables de Beauchamp et des sables de Fontainebleau semblent être plus appropriées à un tunnelier à pression à boue.

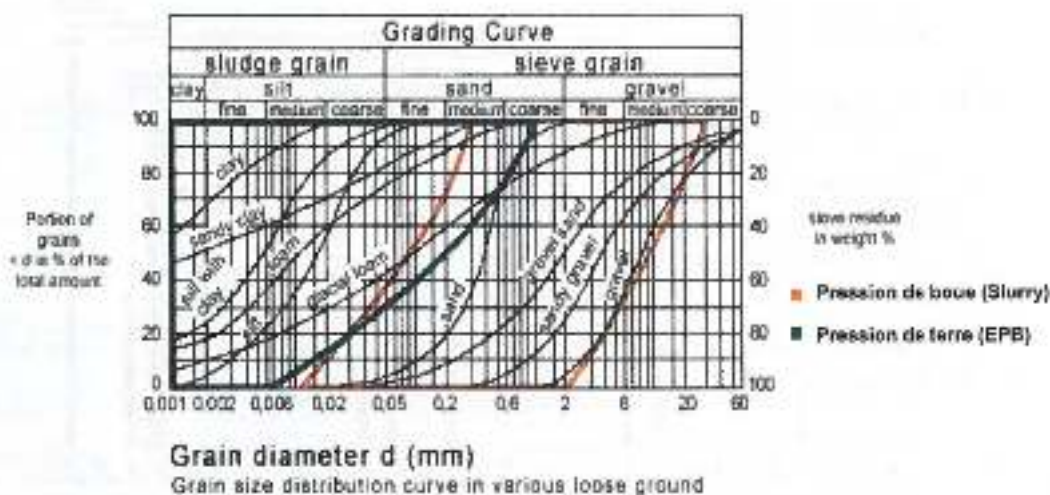


Figure 3 - Influence de la granulométrie du terrain sur le choix du mode de confinement<sup>5</sup>

- le calcul de la pression hydrostatique constitue un argument supplémentaire dans la définition du choix du mode de confinement. On voit rapidement qu'ici toutes les pressions hydrostatiques du site sont inférieures à 3 bars (critère de choix). Un tunnelier à pression de terre est donc suffisant pour le creusement du tunnel dans sa totalité au regard de l'hydrologie.

Enfin, l'altérabilité du milieu avec la possible présence de zone de dissolution de gypse à la base des Marnes Supragypseuses est défavorable à un confinement à pression de boue.

Comme vu dans la première partie les critères prépondérants en termes de risque sont la gestion d'une quantité importante de matériaux fins et celle d'éventuels karsts. Ainsi, un confinement à pression de terre semble être la solution la mieux adaptée sur une majorité du tracé. Il faudra toutefois être prudent lors du creusement du tunnel dans les couches de Sables de Fontainebleau, Sables de Beauchamp et Calcaire Grossier.

<sup>4</sup> LA SECTION SOUTERRAINE DU TRAMWAY T6 - Choix du mode de confinement et aménagements spécifiques.  
G. Lechantre

<sup>5</sup> Cours TSSR (ENTPE) - Denis Branque