

Le Grand Paris Express : technique de creusement des tunnels

Culture Sciences
de l'Ingénieur

Hélène HORSIN MOLINARO - Xavier JOURDAIN
Timothée KLAEYLÉ

Édité le
05/02/2019

école ———
normale ———
supérieure ———
paris-saclay ———

Élève de l'ENS Paris-Saclay, Timothée Klaeylé, lors de sa première année en Sciences pour l'Ingénieur (année SAPHIRE) a suivi le parcours « Ingénierie civile ». Dans ce cadre les élèves ont, sur un thème imposé, à réaliser un état de l'art, un mémoire et à présenter une courte leçon. Cette ressource et les ressources « Le Grand Paris Express : construire 200 km de métro » et « Le Grand Paris Express : la ligne 18 » sont issues de ce dossier.

Le développement du projet Grand Paris Express, son origine et sa justification sont exposés dans la ressource « *Le Grand Paris Express : construire 200 km de métro* » [26], et une des lignes constituant le futur réseau de transport de la région Île-de-France est développé dans la ressource « *Le Grand Paris Express : la ligne 18* » [27].

Pour faire passer le nouveau métro, le percement de tunnels s'est révélé indispensable. Les équipes techniques ont partout fait le choix d'utiliser des tunneliers pour les percer. L'utilisation de ce types d'engins nécessite de creuser un puits, puis de descendre le matériel nécessaire afin d'y assembler sous terre le tunnelier et enfin le mettre en action.



Figure 1 : Tunnel de prolongement de la ligne 14 entre Saint-Lazare et Pont-Cardinet, source [1]

Cette ressource détaille les différentes phases de réalisation des tunnels du Grand Paris Express, des travaux préparatoires des puits-gares au creusement par tunnelier. Un rapide historique des tunneliers est évoqué puis leur fonctionnement est expliqué en détaillant les différentes parties des engins et leurs rôles. Enfin le choix de la technique de creusement est présenté.

1 – Le percement d'un puits depuis la surface

Étape indispensable à la construction d'un tunnel, un puits doit être construit depuis la surface. Le principe présenté ici est le même que celui utilisé pour creuser une gare ; dans le cas du

Grand Paris Express, la plupart des puits seront creusés aux emplacements de futurs points d'arrêt du métro ou des centres de maintenance.

Le chantier se déroule en plusieurs étapes [2] :

- Étape 1 : travaux préparatoires

Ces travaux consistent à retirer de la zone de chantier tous les réseaux divers qui pourraient ralentir le creusement. Il s'agit par exemple de réseaux d'eau, d'électricité ou de gaz. Ces réseaux sont d'abord déviés et rétablis avant d'être retirés.

- Étape 2 : réalisations des parois moulées

Les contours de la gare sont esquissés grâce au creusement successif de deux petites tranchées parallèles puis de murets en béton peu profonds appelés murettes guides (figure 2). Ces murettes guides permettent de matérialiser les contours de la future gare et servent à guider l'outil d'excavation afin qu'il descende le plus verticalement possible.

L'outil creuse alors une tranchée approximativement de la profondeur du puits, soit entre 20 et 70 mètres. Pour en assurer sa stabilité, un mélange d'argile et d'eau appelé bentonite est coulé dans la tranchée pendant la phase de creusement. Une fois la tranchée terminée, les cages d'armatures en acier sont posées. Elles sont dotées de joints d'étanchéité pour assurer un bon contact avec les parois voisines. Le béton est ensuite coulé ; plus lourd que la bentonite, il la chasse vers la surface (figure 3) où elle est récupérée pour être traitée et réutilisée. Les parois moulées vont ensuite durcir.



Figure 2 : Construction des murettes guides, source [2]

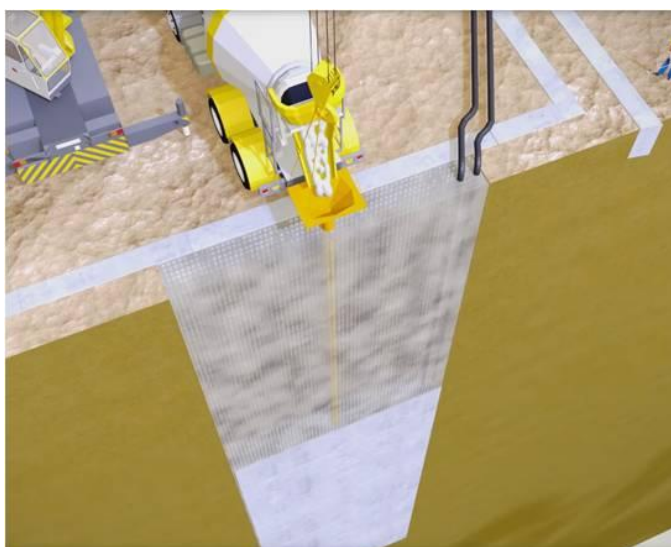


Figure 3 : Coulage du béton dans la tranchée et remonté de la bentonite à la surface, source [2]

Pour faciliter la construction, ces murs ne sont pas réalisées les uns à la suite des autres mais par séries de panneaux, construits de front à plusieurs endroits du puits ou de la gare, ce qui permet aussi d'accélérer la réalisation globale.

- Étape 3 : pré-terrassement

On utilise la terre encore présente au milieu de la future gare pour y couler le toit de la gare. Après décaissement de la hauteur nécessaire au toit, une dalle de béton est coulée de manière à recouvrir entièrement la zone précédemment délimitée. On veille à laisser des ouvertures pour faciliter la suite du chantier (figure 4).

Cette étape est de préférence à éviter si un tunnelier part de la zone de creusement, car si une dalle de béton est déjà coulée en surface cela ne faciliterait pas l'installation du tunnelier en

sous terrain. Cependant dans le cas où il s'agit simplement d'une gare où le tunnelier passe mais n'est ni assemblé ni désassemblé, cette option est préférable.



Figure 4 : Réalisation du pré-terrassement, source [2]



Figure 5 : Creusement en taupe et installation de butons, source [2]

- Étape 4 : le creusement en taupe

Une fois que le futur toit et les futures parois en béton du puits-gare ont acquis une résistance suffisante, il ne reste plus qu'à enlever la terre située à l'intérieur du volume en béton. On utilise alors des machines de chantier traditionnelles types pelles mécaniques pour ces opérations. Enfin, des grues sont chargées de faire remonter la terre et les gravats retirés du sol. On appelle cela le creusement en taupe. Cependant, la pression des terres étant très élevée sur les parois moulées précédemment construites, il est nécessaire de renforcer ces dernières pour éviter qu'elles ne s'effondrent. Pour palier ce problème, on installe généralement des butons qui s'appuient sur deux parois en vis-à-vis pour reprendre la pression des terres (figure 5). On terrasse le fond de gare une fois le creusement terminé puis on coule le radier, une épaisse dalle à la base de l'ouvrage.

- Étape 5 : installation définitive

Le tunnelier, monté au fond même de la gare, peut alors entrer en action, en fracturant une partie des parois de béton précédemment réalisées (figure 6). Une fois le tunnelier passé, les dalles intermédiaires sont réalisées en béton armé et une fois qu'elles sont suffisamment durcies, les butons peuvent être enlevés (figure 7).

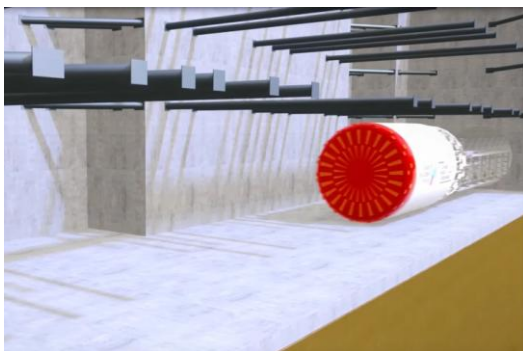


Figure 6 : Passage du tunnelier dans le puits-gare, source [2]

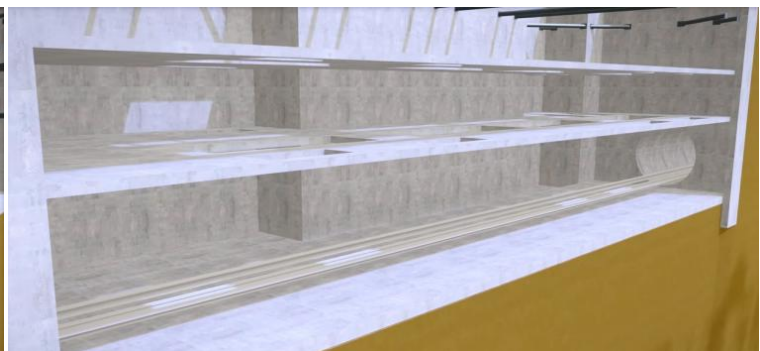


Figure 7 : Pose des dalles intermédiaires, source [2]

2 – Le creusement de galeries par tunnelier

Tous les tunnels du Grand Paris Express seront construits grâce à des tunneliers. Cette technique, permettant de construire des tunnels de section circulaire, est aujourd'hui éprouvée car précédemment utilisée pour de nombreux chantiers. Elle reste cependant une prouesse au vu de la technologie et de la sophistication de l'engin.

2.1 - Bref historique des tunneliers

Les premiers tunnels ont entièrement été creusés et construits à la main par des ouvriers [3]. Cette technique très rudimentaire ne pouvait qu'être optimisée. L'invention de la dynamite en 1866 par Alfred Nobel¹ permit de limiter l'utilisation de la force humaine pour creuser la roche et accéléra le creusement de tunnels, notamment dans les mines. Son invention a surtout permis d'augmenter la sécurité des chantiers et du transport des explosifs en rendant l'explosif plus stable. L'abattage à l'explosif est encore utilisé aujourd'hui pour des galeries courtes. Cependant, ces techniques ne sont néanmoins pas optimales pour la sécurité des ouvriers ou des mineurs, notamment en cas d'arrivée d'eau importantes, ce qui nécessitait des instruments plus protecteurs.

En pleine révolution industrielle, certains pensent à des machines plus puissantes permettant de creuser automatiquement une galerie. Un premier instrument a été inventé en 1825 par Marc Brunel², pour le percement d'un tunnel sous la Tamise à Londres. Il s'agit uniquement d'un bouclier en fonte, permettant de protéger les ouvriers des éboulements, mais où rien n'est mécanisé (figure 8).

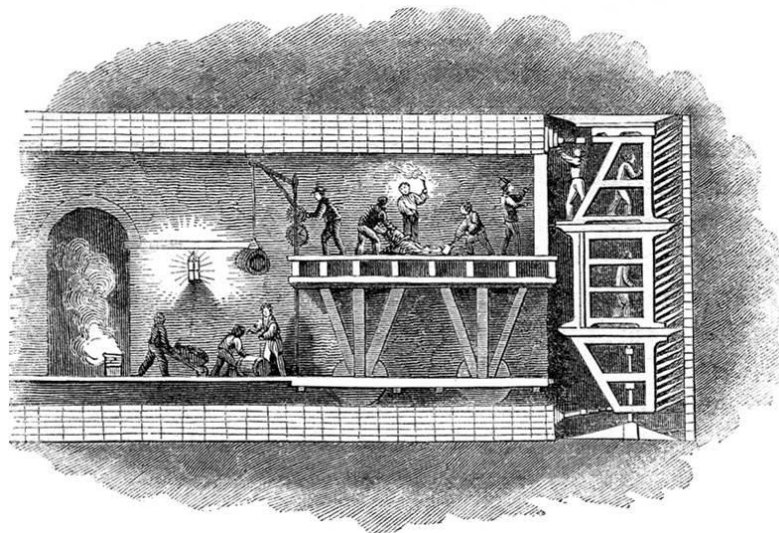


Figure 8 : Le précurseur du tunnelier, inventé en 1825 par Brunel, source [3]

Différentes optimisations du procédé ont été inventées au cours du XIX^e siècle, dans le but d'augmenter la rapidité de construction et la sécurité des ouvriers. Des bras rotatifs frottant sur la roche pour l'émietter apparaissent, et le soutènement définitif est mis en place : il s'agit d'un système de cintres reliés entre eux par des éléments en bois qui forment le revêtement définitif du tunnel. Le bois a été retenu car il a l'avantage de craquer avant de casser, ce qui prévient les ouvriers d'un éboulement imminent, alors que le métal plie silencieusement. Plus tard, les briques puis le béton serviront au revêtement définitif du tunnel. L'utilisation d'air comprimé permettant de pousser l'eau contenue dans la roche ainsi que l'invention du voussoir vont permettre de moderniser la machine.

Le premier tunnelier réellement opérationnel a été construit en 1880³ par Beaumont et amélioré en 1882 par English⁴, prenant ainsi le nom de « machine de Beaumont-English ». Deux galeries-témoin de 1,8 kilomètre chacune ont été percées de chaque côté de la Manche avec cette

¹ Alfred Bernhard Nobel (1833-1896), chimiste et fabricant d'armes suédois

² Marc Isambart Brunel (1769-1849), ingénieur franco-britannique

³ Frederick Edward Blakett Beaumont (1833 - 1899), inventeur britannique dans le Génie militaire

⁴ Thomas English (1843-1935), major de l'armée britannique

nombreuses ouvertures vers l'intérieur du tunnelier (figure 8) qui permettent l'évacuation des roches découpées. Le front du tunnelier peut être pressurisé ou non suivant la présence d'une nappe d'eau et le type de sol traversé.



Figure 11 : Tête de coupe du premier tunnelier du Grand Paris Express, installé à Champigny-sur-Marne, dans le Val-de-Marne, diamètre 10 mètres, source [5]



Figure 12 : Tête de coupe et bouclier du tunnelier de Champigny-sur-Marne, source Laurent Villeret [5]

Le bouclier

Juste après le passage de la tête de coupe, la roche, à proximité du lieu de creusement, peut en sortir fragilisée ; il convient donc de la protéger provisoirement afin qu'elle se stabilise et que le revêtement définitif puisse jouer pleinement son rôle.

Cette protection est assurée par un bouclier. Il s'agit d'un cylindre très rigide de diamètre proche du diamètre du tunnel, en blanc sur la figure 12. En plus de soutenir la roche, le bouclier permet de protéger les équipements et les travailleurs qui officient au plus proche de la roue de coupe.

Le système d'érection de voussoirs (jupe)

Si la roche est fragile, tendre ou imperméable, il est alors nécessaire d'ajouter des soutènements. Ceux-ci sont créés par une pièce déposant des éléments appelés voussoirs qui tapissent les parois et assurent la séparation et la protection de la roche par rapport à la galerie. Les voussoirs (figure 13), sont des éléments épais, larges et courbés, fabriqués en béton armé.



Figure 13 : Exemple de voussoirs en béton préfabriqués, source [6]

Le système d'érection de voussoirs est un élément placé juste derrière le bouclier qui permet de déposer les voussoirs sur les parois du tunnel formant un anneau. La succession des anneaux sur la longueur du percement constitue le revêtement du tunnel. En effet, si les voussoirs ont un rôle déterminant dans la structure du tunnel, ils constituent aussi la paroi intérieure définitive du tunnel que les passagers du métro verront lorsque le chantier sera achevé.

Les formes des voussoirs sont particulièrement étudiées. La plupart sont réalisés sur mesure pour s'adapter aux différents diamètres de galerie possibles ainsi qu'aux différentes charges que ceux-ci auront à supporter. La facilité d'installation et l'étanchéité sont prises en compte également. Selon le diamètre de la galerie et les chargements, un anneau comprend entre 4 et 10 voussoirs, de largeur comprise entre 0,6 et 2 mètres et d'épaisseur variant entre 30 et 40 centimètres. Chaque voussoir pèse environ 8 tonnes. Par ailleurs, on distingue deux types d'agencements de voussoirs [7] :

- l'agencement universel (figure 14), où tous les voussoirs sont de la même forme trapézoïdale. Cette forme permet de recouvrir la paroi aussi bien en ligne droite qu'en courbe selon l'agencement successif des pièces. Cette technique permet quelques économies d'échelle, mais impose un rayon de courbure proche pour tous les virages ;

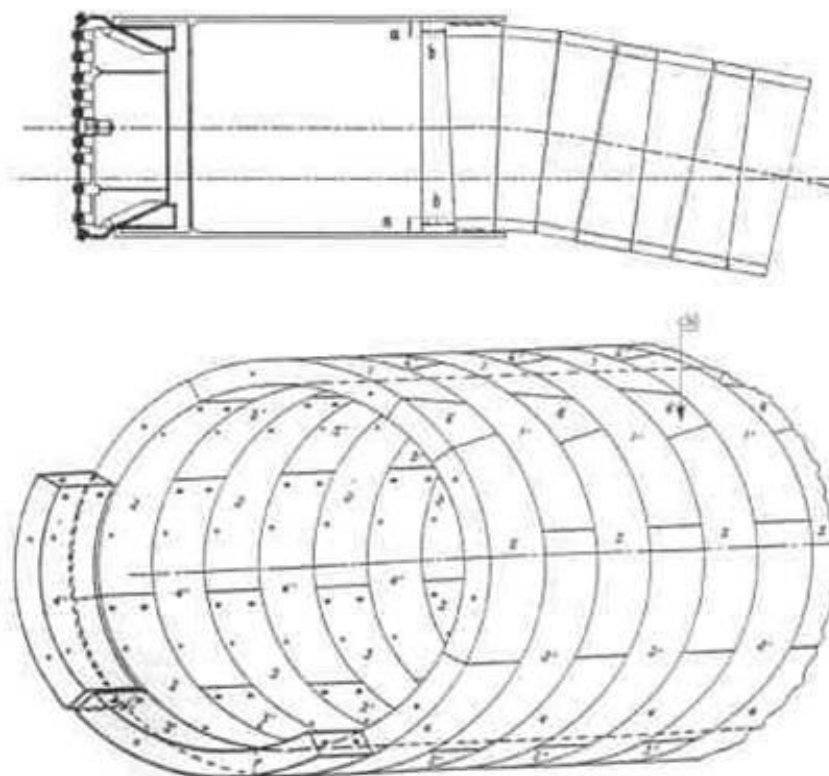


Figure 14 : Exemple d'utilisation de voussoirs universels, source [7]

- l'agencement mixte, comportant des voussoirs rectangulaires pour les lignes droites et des voussoirs trapèzes pour les courbes. Cette technique permet d'adapter la construction en fonction du rayon de courbures de galeries mais peut être plus onéreux.

Afin d'optimiser l'étanchéité, des joints sont mis en place entre les voussoirs d'un même anneau et entre les anneaux successifs. Enfin, pour faciliter leur installation à l'aide de vérins, ils comportent des trous peu profonds sur leur paroi intérieure.

Les voussoirs sont donc déposés par un système d'érection contre la paroi du tunnel (figure 15). À ce moment, la tête de coupe n'avance pas afin de faciliter l'installation des voussoirs. Ils sont placés successivement depuis l'intérieur du futur anneau sauf le dernier voussoir, appelé « clef »,

qui nécessite l'avancée de la machine pour être déposé par l'avant de la galerie en longeant la paroi. La pose se fait à l'aide de vérins.

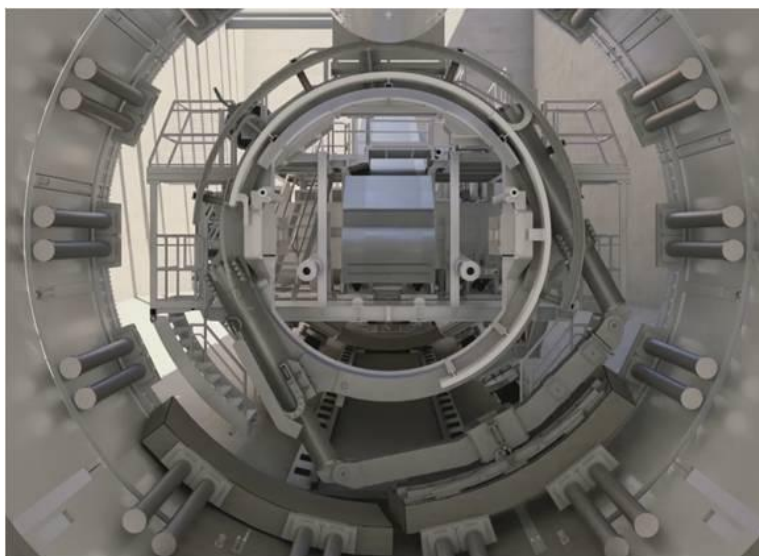


Figure 15 : Pose de voussoirs par le tunnelier, source [4]

Si la roche est suffisamment dure et imperméable, alors la stabilité du tunnel est en grande partie assurée par les caractéristiques de la roche et il n'est pas forcément nécessaire d'ajouter d'imposants éléments protecteurs. Cependant, même dans cette situation, on peut ajouter une casquette protégeant la partie supérieure du tunnel des éboulements éventuels, construite par exemple en béton projeté.

Le système d'extraction

Les roches concassées par la roue de coupe descendent par gravité vers le bas de la roue et sont ensuite récupérées grâce à une vis d'Archimède (en rouge figure 16). Les gravats sont ensuite amenés jusqu'au train suiveur par tapis roulant.



Figure 16 : Évacuation des déblais par la vis d'Archimède vers le convoyeur, source [4]

Le système d'avance

Le système d'avance permet à la tête de coupe de progresser dans le creusement. Ce système est constitué de puissants vérins qui s'appuient sur le dernier anneau de voussoirs posé pour faire avancer la tête. En effet, une fois un anneau de voussoirs déposé, les bords des voussoirs forment

un plan orthogonal à la direction de coupe. C'est sur cette surface que les vérins s'appuient à l'aide de crampons pour pousser la machine (figure 17).

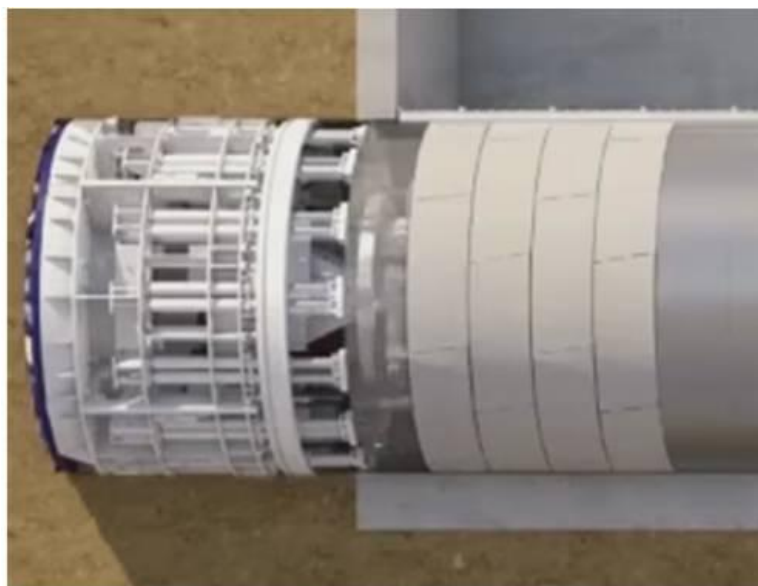


Figure 17 : Système d'avance où les vérins (au centre) s'appuient sur les voussoirs (à droite) pour pousser le bouclier (à gauche), source [4]

Lors de la pose des voussoirs, ces vérins se rétractent vers la roue de coupe qui cesse d'avancer afin de permettre l'installation des voussoirs par d'autres vérins de direction orthogonale.

Le train suiveur

Le train suiveur permet l'approvisionnement et la gestion de tout ce qui est nécessaire pour le fonctionnement de la partie avant du tunnelier (figure 14). Il comporte d'une part un tapis roulant permettant l'extraction des gravats, et d'autre part un système conduisant les voussoirs jusqu'au système d'érection. D'une longueur totale pouvant faire plusieurs centaines de mètres, il permet aussi le lien avec l'extérieur.

En amont du train suiveur, une voie ferrée provisoire peut permettre l'acheminement de matériels (voussoirs), de personnes et l'extraction des roches concassées vers le puits le plus proche. Une zone d'embarquement est prévue à l'arrière du train suiveur, où la voie ferrée provisoire est par ailleurs complétée au fur et à mesure de l'avancement du tunnelier. Enfin, le train suiveur comprend des zones de vie pour le personnel.



Figure 18 : Tunnelier de Champigny avec une partie du train suiveur à droite, source Laurent Villeret [5]

2.3 - Le choix de la technologie du tunnelier pour le Grand Paris Express

L'intégralité des tunnels du Grand Paris Express sera percée avec des tunneliers.

Le choix de réaliser les tunnels en tranchée couverte, comme cela a été le cas pour la plupart du métro parisien (figure 19), a très vite été écarté :

- le tracé des lignes ne permettait pas un creusement intégral depuis la surface : le relief peut par endroit être très brutal, avec des fortes côtes et vallées à traverser, comme la vallée de la Seine à Boulogne-Billancourt ou la vallée de la Bièvre à Cachan. Ce réel obstacle aurait nécessité un creusement depuis l'intérieur du sol à ces endroits pour que les voies aient un dénivelé progressif ;
- dans les zones où le relief est plus progressif, aucun axe de communication existant ne suit approximativement le tracé du métro. Ce fait aurait nécessité de nombreuses expropriations et destructions de bâtiments pouvant faire envoler les coûts et provoquer des oppositions des riverains ;
- les nuisances de chantier auraient été très importantes.



Figure 19 : Exemples de construction du métro en tranchée couverte : Paris, rue de Rivoli mai 1899, source [8], et Rennes, juin 2015, source [9]

Il restait trois autres techniques : le creusement à l'explosif, à la machine à attaque ponctuelle ou au tunnelier. Ce dernier avait de nombreux avantages par rapport à l'explosif [10] :

- réduit les nuisances sonores pour l'environnement, car aucun bruit d'explosif ;
- ne fragilise pas la roche, alors que l'explosif peut causer des fragilisations inattendues ;
- ne génère pas de fumées toxiques difficiles à évacuer pour de longs tunnels ;
- permet une économie de béton grâce au découpage parfait des parois par la tête rotative ;
- est plus sûr pour le personnel de chantier ;
- permet une construction plus rapide.

Pour valider l'hypothèse d'un tunnelier, des mesures sur les roches ont été effectuées pour trouver la résistance en compression et le degré de fracturation de la roche. À partir de ces données sont indiquées des plages d'utilisation préférentielles de certains outils dans le diagramme de la figure 20. L'indice de fracturation est un rapport entre vitesses de propagation d'ondes [10] :

$$I_c = \frac{V_{lm}}{V_{lc}} \quad (1)$$

Où V_{lm} est la vitesse mesurée sur échantillon et V_{lc} , la vitesse calculée à partir de la composition minéralogique. Cet indice varie de 0 si le sol est très fracturé à 1 s'il ne l'est pas du tout. Pour

déterminer le taux de fractures d'un sol il est également possible d'utiliser le RQD (Rock Quality Designation) décrit dans la norme étasunienne ASTM STP 984.

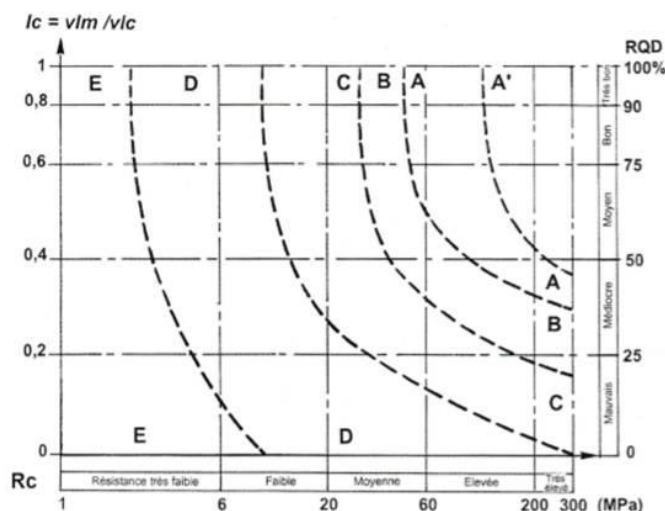


Figure 20 : Méthodes de creusement préférentielles selon les caractéristiques de la roche, à chaque lettre est associé un type d'outil ; A' : tunnelier puissant ; A, B et C : tunnelier ; B, C et D : machine à attaque ponctuelle ; A, A' et B : explosifs, source [10]

En plus des raisons évoquées précédemment et de la nature du sol, les professionnels ont déduit qu'il fallait de préférence utiliser un tunnelier pour les travaux du Grand Paris Express.

D'autres données permettent d'identifier le type de roche et d'en déduire le tunnelier à choisir. On définit l'indice de « fragilité » des roches de la manière suivante :

$$IFR = \frac{\sigma_c}{\sigma_{tB}} \quad (2)$$

Où σ_c est la résistance à la compression uniaxiale et σ_{tB} , la résistance obtenue au test de fendage brésilien. Ce quotient permet de qualifier le caractère cassant ou fragile d'une roche (figure 21).

IFR	Roche
Inférieur à 10	Peu fragile
Entre 10 et 15	Fragile
Supérieur à 15	Très fragile

Figure 21 : Fragilité de la roche selon IFR

La puissance du tunnelier est alors à adapter en fonction des différents indices de fragilité des roches rencontrées le long du tracé. Des échantillons de roches sont collectés, des essais sont effectués ou identifiés à une roche connue. Cette étape est très délicate en région parisienne car la composition du sol est très fluctuante et deux forages proches géographiquement peuvent révéler des caractéristiques géologiques complètement différentes. C'est à cause de ces imprévus géologiques que la mise en service de la ligne 15-Sud a été en 2015 repoussée de 2020 à fin 2022.

La puissance choisie dépend également de la dureté propre de la roche en plus de sa capacité à se fracturer. On prend ici directement en compte σ_c , qui est généralement le critère limitant (tableau d'équivalence figure 18).

Résistance à la compression uniaxiale	Puissance
30 à 50 MPa	50 à 100 kW
50 à 80 MPa	100 à 200 kW
100 MPa	200 à 300 kW

Figure 22 : Tableau d'équivalence entre la résistance à la compression uniaxiale et la puissance

À partir de ces puissances, on peut en déduire des vitesses d'avancement, qui peuvent être données en m/mois pour une roche peu fragile ou en m/h pour une roche moyennement fragile ou fracturée. Par exemple, dans le cas d'une roche peu fragile ($IFR = 10$) et peu fracturée ($I_c > 75\%$) on obtient le tableau figure 19.

Résistance à la compression uniaxiale	Puissance
Inférieure à 50 MPa	6 m/h
Entre 50 et 100 MPa	3 à 5 m/h
Supérieure à 100 MPa	2 m/h

Figure 23 : Tableau d'équivalence entre la résistance à la compression uniaxiale et la vitesse d'avancement

Ces valeurs restent toutefois indicatives car des aléas peuvent survenir lors de la construction du tunnel et retarder l'achèvement du chantier. Par exemple, pour le prolongement de la ligne 14 de Saint-Lazare à Mairie de Saint-Ouen, la mise en service avait été annoncée lors de la mise en chantier à l'horizon 2017. Or, deux aléas de chantier importants (fuites d'eau) ont repoussé la mise en service à 2020 [11].

2.4 - Le guidage du tunnelier

Connaître la position exacte du tunnelier est essentiel pour percer dans la bonne direction. Les tolérances de positionnement sont faibles dans ce domaine, de l'ordre de plus ou moins 5 centimètres [12].

Le système de guidage s'appuie sur plusieurs points de repère fixes installés par le géomètre de chantier tous les 100 à 250 mètres. Grâce à un tachéomètre (figure 24) on peut connaître la position exacte du centre de la roue de coupe et de la jupe et ainsi mesurer l'écart entre la position réelle et la position théorique, en prenant en compte les écarts éventuels avec la position théorique des points de repère. Ces consignes de pilotages sont transmises :

- aux vérins de poussée, qui peuvent alors précisément faire varier leurs courses selon leur position afin d'engager un virage à gauche ou à droite. Ils sont généralement groupés par groupes de 3 ou 4 vérins où la pression hydraulique est identique ;
- aux systèmes de pose de voussoirs, pour que soit choisis des voussoirs ayant une allure courbe ou droite.



Figure 24 : Tachéomètre permettant de connaître la position exacte de la roue de coupe [13]

Toutes ces données sont traitées par un logiciel de guidage compris dans les ordinateurs des tunneliers, situés dans le train suiveur. En plus d'indiquer la direction à prendre pour la roue de coupe, le système de mesure permet aussi de détecter les défaillances du système de guidage.

2.5 - La résistance de la voûte du tunnel après percement

On peut avoir un premier ordre de grandeur de la pression des terres sur les voussoirs par la formule du chaudronnier [14].

On modélise en deux dimensions les charges s'exerçant sur un demi-tunnel de longueur L comme représenté sur la figure 25. On suppose que les parois du tunnel sont circulaires de rayon intérieur r et d'épaisseur e faible devant le rayon ; elles sont supposées uniformes. Elles sont soumises à une pression p , qu'on suppose constante selon la profondeur. Le poids est négligé devant cette pression. σ représente la contrainte normale dans les voussoirs.

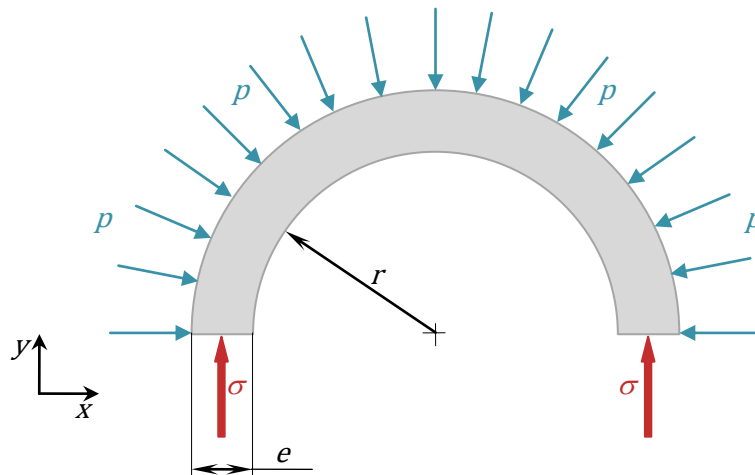


Figure 25 : Modélisation de la pression hydrostatique sur les voussoirs

Le système isolé est un demi-tunnel, les flèches représentent les efforts et les contraintes s'exerçant sur le système.

Le théorème de la résultante statique en utilisant la surface projetée pour l'action de la pression donne (ce qui est équivalent à faire l'équilibre $\sum \vec{F} \cdot \vec{y} = 0$) :

$$\sigma \times 2eL = p \times 2(r + e)L \quad (3)$$

Où L est la longueur du tunnel. On a donc :

$$\sigma = \frac{p \times (r + e)}{e} \quad (4)$$

Soit, en considérant $r \gg e$

$$\sigma \approx \frac{pr}{e} \quad (5)$$

Prenons l'exemple d'un tunnel à 20 m de profondeur dans du calcaire, de rayon intérieur 5 m et d'épaisseur 20 cm, la contrainte normale σ subie par le béton est d'environ 13 MPa, avec $p = \rho gz$ ($\rho = 2600 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ pour du calcaire) :

$$\sigma \approx \frac{(2600 \times 9,81 \times 20) \times 5}{0,2} = 12,7 \cdot 10^6$$

Cette modélisation suppose que les contraintes sont uniformes, ce qui n'est pas le cas en réalité. En effet, la pression des terres varie en fonction de la profondeur. Il faudrait alors supposer que le diamètre du tunnel soit bien inférieur à la profondeur, ce qui n'est pas souvent le cas pour les métros. Si cette modélisation donne un bon ordre de grandeur, il est possible de l'affiner.

Lorsqu'on trace les contraintes, on observe un effet de voûte [15]. Avant le percement du tunnel, dans un élément en clef de voûte, les contraintes majeures au repos sont les contraintes verticales (σ_{yy}) et les mineures sont les horizontales ($\sigma_{xx} = K_0 \sigma_{yy}$). K_0 est le rapport des contraintes horizontales et verticales. Il vaut généralement 0,5, voire 1 pour un champ hydrostatique.

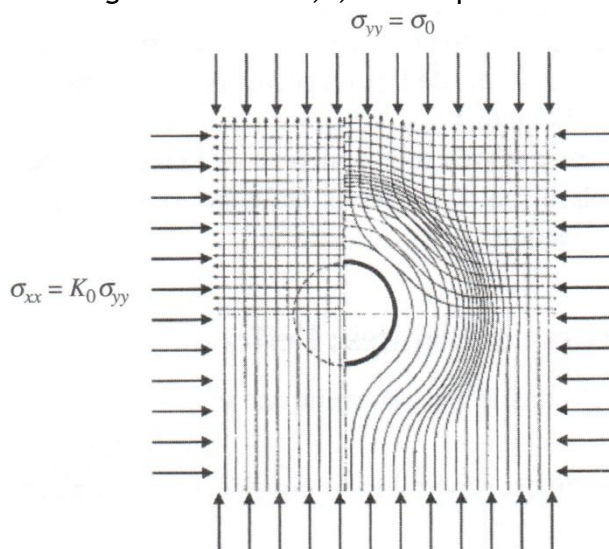


Figure 26 : Rotation des contraintes principales, à gauche avant le percement et à droite après, source [15]

Après le percement, les contraintes « s'inversent », la contrainte horizontale devient la majeure et la contrainte verticale la mineure comme l'illustre la figure 26, où à gauche est représentée la répartition de contraintes avant le creusement et à droite la répartition après le creusement. C'est ce qu'on appelle la rotation des contraintes principales.

Il est possible de poser le problème de mécanique des milieux continus pour exprimer la contrainte autour de la cavité afin de vérifier qu'il n'y ait pas de ruptures dans le sol après le creusement du tunnel ce qui pourrait avoir des conséquences fâcheuses pour les éventuelles constructions en surface. On prend les notations de la figure 27.

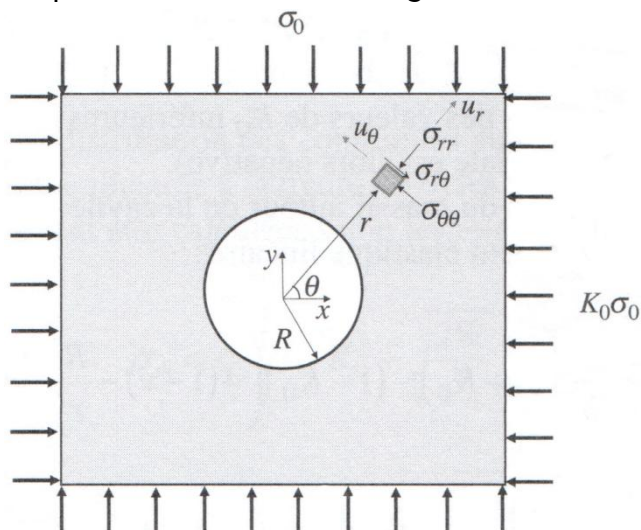


Figure 27 : Schéma résumé du problème de mécanique des milieux continus [15]

Leur expression est donnée par les formules de Kirsch⁵ [15] :

$$\sigma_{rr} = \frac{\sigma_0}{2} \left((1 + K_0) \left(1 - \frac{R^2}{r^2} \right) - (1 - K_0) \left(1 - \frac{4R^2}{r^2} + \frac{3R^4}{r^4} \right) \cos 2\theta \right) \quad (6)$$

⁵ Ernst Gustav Kirsch (1841-1901), ingénieur mathématicien allemand

$$\sigma_{\theta\theta} = \frac{\sigma_0}{2} \left((1 + K_0) \left(1 + \frac{R^2}{r^2} \right) + (1 - K_0) \left(1 + \frac{3R^4}{r^4} \right) \cos 2\theta \right) \quad (7)$$

$$\sigma_{r\theta} = \frac{\sigma_0}{2} \left((1 - K_0) \left(1 + \frac{2R^2}{r^2} - \frac{3R^4}{r^4} \right) \sin 2\theta \right) \quad (8)$$

K_0 représente le rapport entre la contrainte horizontale et la contrainte verticale avant excavation. La contrainte dimensionnante est alors $\sigma_{\theta\theta}$:

$$\sigma_{\theta\theta} < \sigma_c \quad (9)$$

Où σ_c est la résistance à la compression simple de la roche.

On observe cependant qu'il existe une zone plastique autour de la cavité cylindrique, c'est-à-dire dans la zone la plus fragile. En utilisant la loi élasto-plastique de Mohr-Coulomb⁶ [15], l'étendue de cette zone peut être donnée par la relation (10).

$$R_c = R \left(\frac{2\lambda_e}{(K_p+1)\lambda_e - (K_p-1)} \right)^{\frac{1}{K_p-1}} \quad (10)$$

Avec $\lambda_e = \frac{1}{K_p+1} \left(K_p - 1 + \frac{\sigma_c}{\sigma_0} \right)$, $K_p = \frac{1+\sin\phi}{1-\sin\phi}$ et $\sigma_c = \frac{2c \cdot \cos\phi}{1-\sin\phi}$ et, en prenant les notations de la figure 27, $K_0 = 1$ en considérant un champ de contrainte hydrostatique, et avec ϕ l'angle de frottement de la roche équivalant pour un sable sec à l'angle de talus naturel.

Cette zone modifie légèrement le calcul des contraintes autour de la cavité que la figure 28 représente. Elle est donc à prendre en compte lors de la conception du bouclier et lors de la conception des voussoirs.

Lorsque l'on effectue réellement ce dimensionnement, on considère deux hypothèses fortes :

- la roche est homogène, or c'est très rarement le cas ;
- le problème est 2D, car la déformation du massif se fait avant même l'arrivée du tunnelier à la hauteur du massif.

La répartition des contraintes peut également varier dans le temps à partir du moment où le massif commence à être perforé et même après avoir été creusé. Ainsi, la mise en place prématurée d'un soutènement empêche la redistribution de contraintes autour du tunnel et produit des efforts importants sur les voussoirs, alors qu'un soutènement trop tardif ne permet pas d'éviter des déplacements excessifs du soutènement et peut fragiliser le massif. On utilise alors des méthodes dites de « convergence-confinement » pour prendre en compte ces hypothèses.

⁶ Christian Otto Mohr (1835-1918), ingénieur mécanicien allemand
Charles Augustin Coulomb (1736-1806), ingénieur physicien français

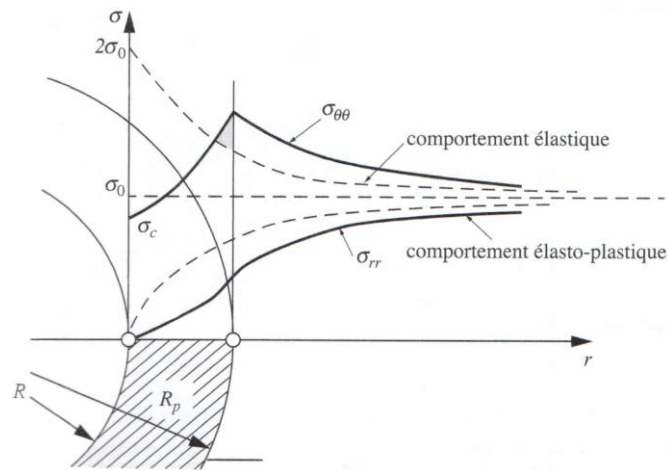


Figure 28 : Répartition des contraintes autour de la cavité, source [15]

Pour plus de détails sur cette partie se reporter à [15].

3 – Précautions en surface et en gare

Pour réduire les coûts mais aussi l'impact environnemental d'un tel projet, de nombreuses précautions sont prises, de l'installation du tunnelier aux risques liés au travail en région parisienne : présence d'anciennes carrières fragilisant les sols, construction en surface à protéger, gestion des déblais,... rien n'est laissé au hasard.

3.1 - L'installation du tunnelier

Le tunnelier est tout d'abord assemblé entièrement chez son fabricant. Le premier tunnelier du Grand Paris Express a été assemblé en Allemagne chez Herrenknecht. Il est ensuite démonté et amené en pièces détachées jusqu'au puits. Le premier puits est situé à Champigny-sur-Marne, à l'emplacement d'un futur centre de maintenance. Les premières pièces sont arrivées en janvier 2018. Le tunnelier est d'abord baptisé, selon une tradition surannée, toujours avec un prénom féminin. À Champigny, il s'appelle « Steffie-Orbival », Orbival étant en référence au premier projet de métro en rocade réellement considéré.

Le tunnelier est ensuite progressivement assemblé au niveau du puits, en commençant naturellement par la roue de coupe et en terminant par le train suiveur [4]. L'assemblage se fait pour certains éléments à la surface, et pour d'autres, plus volumineux, il peut avoir lieu au fond du puits. Certains butons installés dans le puits peuvent être retirés pour faire passer tous les éléments au fond du puits. Pour faire fonctionner le tunnelier, il faut au minimum avoir assemblé la roue de coupe, le bouclier, le système de pose des voussoirs et les trois premiers wagons du train suiveur. Le reste des wagons sera ajouté au fur et à mesure de sa progression.

Pour permettre au tunnelier de démarrer, on le glisse dans un creux appelé cloche (figure 29), que l'on colle à la paroi de béton située au fond du puits. Les vérins de poussée s'appuient sur les parois intérieures de la cloche pour pousser la roue de coupe, qui commence par fracturer le béton précédemment coulé avant de creuser dans le sol. Une fois les premiers voussoirs déposés, le tunnelier peut fonctionner comme décrit plus haut.

Lorsque le tunnelier traverse une future gare souterraine déjà creusée, des voussoirs sont également déposés par la jupe au fond de la gare pour former un demi-anneau sur lequel le train suiveur pourra s'appuyer (figure 30). Pour avancer, les vérins de poussée s'appuient uniquement sur ces voussoirs. La force de poussée reste suffisante pour les vérins car ici aucune charge autre

que le poids ne s'applique sur la roue de coupe, et donc la progression réclame une force bien plus faible.

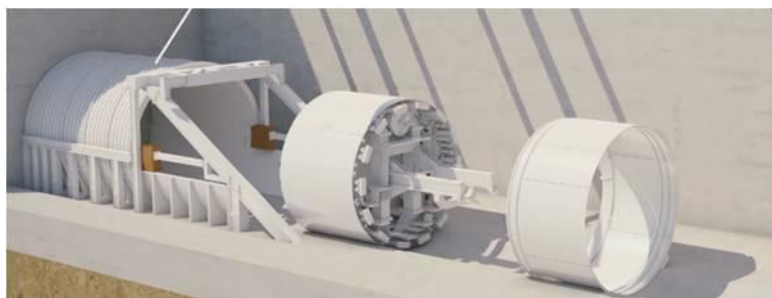


Figure 29 : Glissement du tunnelier à l'intérieur d'une cloche pour son démarrage, source [4]

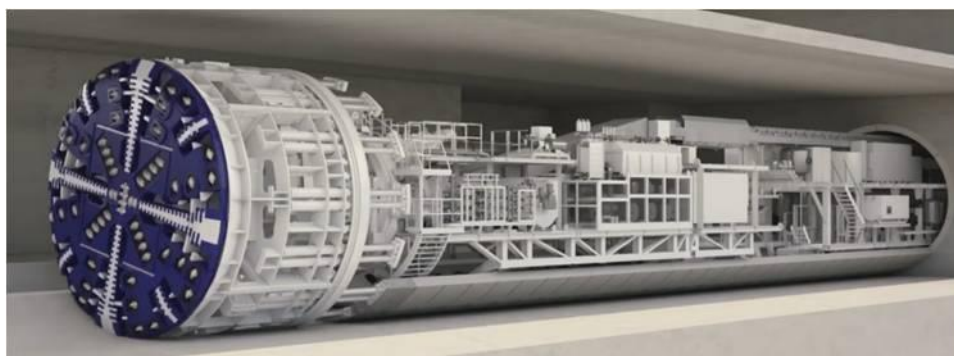


Figure 30 : Traversée d'une gare par le tunnelier à l'aide de voussoirs inférieurs, source [4]

Une fois le tunnel achevé, le tunnelier est démonté à son puits d'arrivée, sous terre et en surface. Un diagnostic des pièces est effectué, et les pièces encore en bon état seront réutilisées pour d'autres tunneliers tandis que les autres seront traitées.

3.2 - Le comblement de carrières

Le sous-sol de la région parisienne contient de nombreuses matières premières utilisées dans le bâtiment notamment, comme le gypse, la meulière ou l'argile. Certaines carrières sont encore en exploitation de nos jours, comme celle de Cormeilles-en-Parisis (Val-d'Oise) [16], mais la plupart ont cessé leur activité, notamment en zone urbaine dense. Néanmoins, les galeries souterraines existent encore, et il faut y prendre garde lors de la construction d'un nouveau tunnel.

Des relevés géologiques, corrélés aux données historiques ont permis de déterminer les passages des tunnels du Grand Paris Express à proximité de galeries minières. À certains endroits, comme à Bagneux (Hauts-de-Seine), il est nécessaire de combler ces carrières pour assurer la stabilité du sol où seront construits les tunnels [17].

La technique privilégiée par la Société du Grand Paris est l'injection de mortier depuis la surface. Le comblement s'effectue par forages depuis la surface et injection de mortiers (figure 31) :

- aux extrémités de la zone à combler, on injecte du mortier à prise rapide grâce à plusieurs forages. Cela permet de délimiter la zone à combler lorsque la carrière s'étend au-delà de la zone de passage du métro ;
- on effectue ensuite plusieurs forages entre la surface et la carrière pour injecter à l'aide de tubes en PVC un mortier liquide jusqu'à ce qu'il remplisse entièrement la carrière. On appelle cette opération « injection gravitaire » ;
- après durcissement du mortier, on effectue une injection de « clavage » afin de combler les vides résiduels.

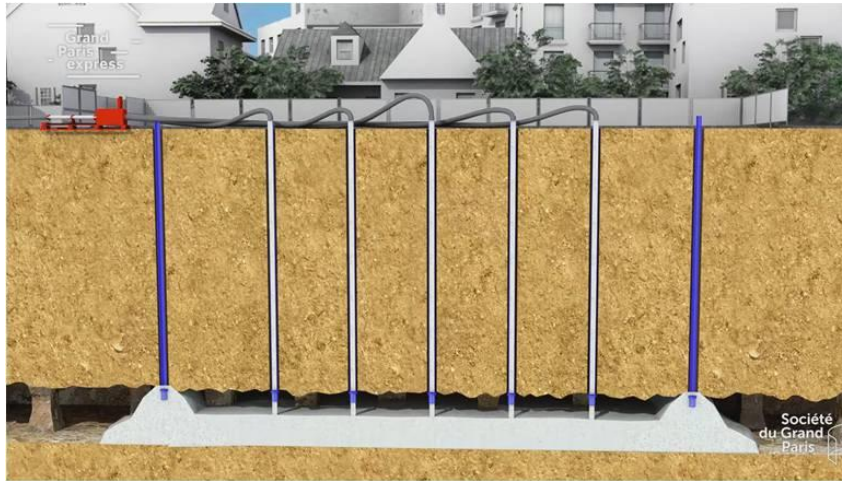


Figure 31 : Comblement de carrière : aux extrémités droite et gauche se trouve un mortier à prise rapide, et au centre un mortier liquide au-dessus duquel on fera une injection de clavage, source [18]

Cependant, cette technique n'est pas toujours possible, car la carrière peut se situer sous des zones bâties denses où la réalisation de plusieurs forages est impossible. Dans ce cas, on réalise le comblement par injection depuis un puits d'accès :

- soit on creuse un puits d'accès large à une profondeur intermédiaire puis on réalise les mêmes opérations que précédemment mais en forant en diagonale (figure 32) ;
- soit on creuse un puits d'accès direct jusqu'à la carrière où des murs épais sont édifiés aux extrémités de la zone à traiter, puis on effectue les injections gravitaires et de clavage ;
- soit on creuse un puits d'accès à la carrière où les piliers existants sont renforcés ou complétés par des nouveaux piliers en béton.

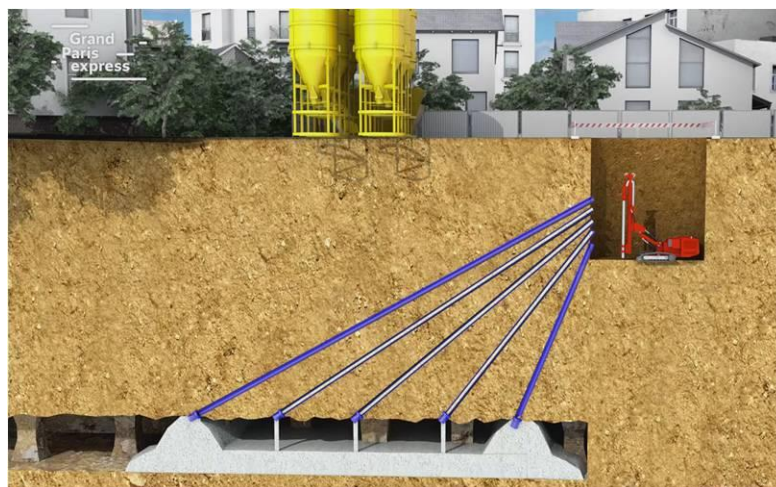


Figure 32 : Exemple de comblement de carrières en creusant un puits, source [18]

Le puits est ensuite comblé pour fermer définitivement l'accès.

3.3 - Le traitement des déblais de chantier

Le traitement des déblais issus de la construction des tunnels constitue un défi environnemental majeur. En effet, le chantier a pour conséquence d'augmenter de 10 à 20% la quantité de déblais générés chaque année en Île-de-France, soit au total 45 millions de tonnes.

La Société du Grand Paris s'est engagée à valoriser 70% des terres issues du creusement des tunnels [19]. Généralement, les terres sont stockées dans des déchetteries ou dans des zones allouées dans un objectif plus lointain de valorisation. Le meilleur exemple est celui de la colline d'Élancourt (figure 33), dans les Yvelines, point culminant de l'Île-de-France (231 m), qui a été

entièrement édiflée grâce aux remblais de la ville nouvelle de Saint-Quentin-en-Yvelines dans les années 1980 ; elle accueille à présent une piste de VTT olympique. Dans le cas du Grand Paris Express, un schéma directeur des déblais a été réalisé afin de réfléchir aux sites pouvant potentiellement accueillir des déblais. Il s'agit aussi bien de zones de traitement existantes (45%) que de carrières fragiles en pleine campagne qui nécessitent d'être comblées (49%) comme à Montmorency dans le Val-d'Oise (la plus grande carrière de gypse d'Europe), que de projets de réaménagement (6%). Ces sites se situent principalement en Île-de-France ou à proximité afin de réduire le transport.



Figure 33 : La colline d'Élancourt, source [29]

Pour encore limiter l'impact environnemental du chantier, une partie du transport de ces déblais se fera par voie fluviale ou via le fret. Des sites pouvant accueillir de telles zones d'embarquement ont été identifiées à proximité du tracé des futures lignes. Cet aspect a été particulièrement pris en compte lors du choix des points d'entrée de tunneliers, comme la montre l'exemple de la ligne 15 sud à Vitry-sur-Seine (Val-de-Marne). Le site de Vitry-Les-Ardoines est situé dans une zone industrielle en bordure de Seine, donc assez éloigné de zones à contraintes (habitations, hôpitaux,...) et le long d'une artère fluviale (figure 34). Il a été choisi pour accueillir au total trois tunneliers, un partant vers l'ouest, un autre vers l'ouest et un dernier creusant le tunnel d'accès au centre de maintenance, ce qui est considérable ! Ceci permet la création d'un espace d'embarquement où les déblais seront déposés sur des péniches directement depuis le tunnel pour être évacués par la Seine.

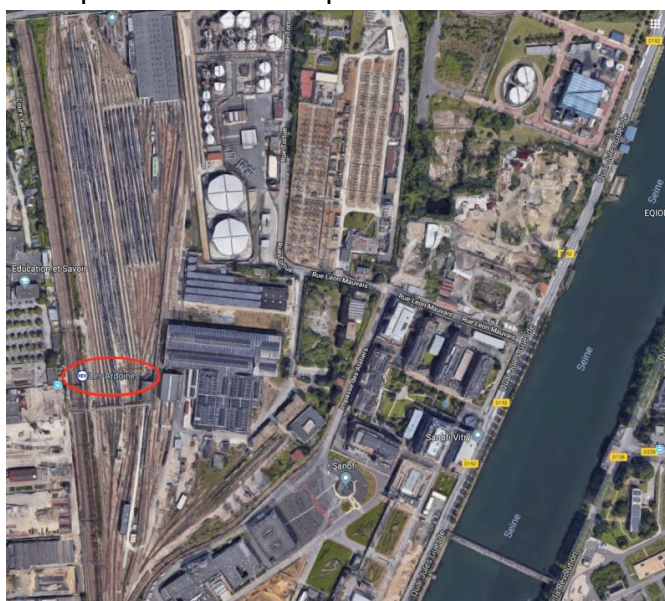


Figure 34 : Site des Ardoines, d'où partiront 3 tunneliers, à proximité d'une zone portuaire, source Google Maps

3.4 - La surveillance du sol

Le creusement d'une galerie perturbe la géologie locale et fragilise inévitablement le sol. Les galeries étant assez profondes, le risque d'effondrement depuis la surface n'est pas le plus élevé ici. Cependant, le sous-sol francilien peut réserver certaines surprises, malgré les nombreux forages test réalisés pendant les phases d'étude. Un système de surveillance a donc été mis en place [20].

La première méthode permet de mesurer le déplacement des bâtis. Elle consiste à placer sur des maisons ou immeubles des capteurs qui détectent tout déplacement de l'édifice. Cette surveillance commence avant les travaux, afin d'avoir des relevés témoins et constater une évolution. La seconde méthode est une méthode d'interférométrie. Elle comporte deux phases :

- la première consiste à faire un état des lieux des sites à surveiller à l'aide d'images satellite anciennes, pour observer l'évolution des mouvements du sol pendant les 25 dernières années ;
- la seconde, appelée phase travaux, consiste à programmer des satellites spécifiquement pour le projet du Grand Paris Express. Ceux-ci seront chargés d'envoyer des ondes au niveau des points de contrôle et de mesurer leur temps de retour. Ainsi, si un sol se tasse à cause du passage d'un tunnelier par exemple, le temps de retour du signal sera plus long. Un satellite prendra ainsi trois mesures par mois dans chaque zone où passera le métro, et les données seront analysées dans un centre de traitement à Barcelone.

3.5 - Accès de service

Les accès de service ont deux rôles majeurs : le passage pour une évacuation d'urgence et le renouvellement de l'air nécessaire pour les ouvrages souterrains.

L'évacuation d'urgence peut se faire généralement soit par une galerie secondaire creusée parallèlement au tunnel principal, soit par un puits de service remontant à la surface. Dans le cas du Grand Paris Express, le creusement d'une galerie parallèle a été exclu compte tenu du coût important d'utilisation du tunnelier pour construire ici une seconde galerie, cette solution étant plutôt réservée aux tunnels routiers ou ferroviaires de très grande longueur.

L'aération des quais souterrains des gares est assez aisée car un accès direct à la surface est disponible. À l'intérieur des tunnels, deux solutions sont initialement envisageables pour l'aération :

- installer des grands ventilateurs qui permettent de faire circuler l'air dans les galeries et gérer les flux d'air dus au passage d'un train ;
- creuser depuis la surface des galeries d'aération.

La première solution est inévitable pour certains ouvrages sous une montagne ou sous un fond marin comme le tunnel sous la Manche, mais pour le Grand Paris Express, la seconde solution a été choisie, la profondeur du métro, comprise entre 15 et 55 mètres, étant raisonnable pour creuser des puits. Construire des puits permettait donc dans le cadre du Grand Paris Express de trouver une solution aux problèmes d'évacuation d'urgence et d'aération.

L'écartement entre chaque puits doit être de 800 mètres maximum. Par exemple, sur la future ligne 15 sud, deux puits seront creusés entre les stations Arcueil-Cachan et Villejuif-Institut-Gustave-Roussy distantes de 2 km, l'un à côté de la mairie de Cachan et l'autre sur les hauteurs de la ville, dans le jardin panoramique. Tous deux sont, en 2019, en construction (figure 35).



Figure 35 : Construction du puits d'évacuation au jardin panoramique de Cachan, source T. Klaeylé

Le creusement de puits verticaux peut se faire à l'aide de parois moulées (puits du jardin panoramique de Cachan) ou encore d'un tunnelier vertical, aussi appelé VSM (Vertical Shaft Machine). Par exemple, sur le chantier de construction d'un accès de service sur la ligne 15 sud à Malakoff (92), un tunnelier vertical est utilisé pour construire le puits de 40 mètres de profondeur et 11,3 mètres de diamètre. Contrairement au tunnelier horizontal, il ne comporte pas d'imposante roue de coupe mais une fraise (figure 36) montée sur trois vérins permettant de couvrir l'intégralité de la zone à creuser.

Un premier anneau de voussoirs est monté et posé à l'emplacement du puits en surface avant l'installation de la machine. Cet anneau possède une couronne métallique à la base qui lui permettra de s'enfoncer facilement dans le sol. La fraise est ensuite fixée à ce premier anneau de voussoirs puis creuse dans la direction verticale, et notamment sous l'anneau de voussoirs. Cet anneau glisse progressivement dans la cavité creusée et s'enfonce dans le puits. Un nouvel anneau de voussoirs est alors posé sur le premier, l'installation des voussoirs se faisant en surface. La fraise continuant à creuser, ces deux anneaux vont descendre et il faudra à nouveau rajouter un anneau, et c'est ainsi jusqu'à ce que le puits atteigne la profondeur souhaitée.

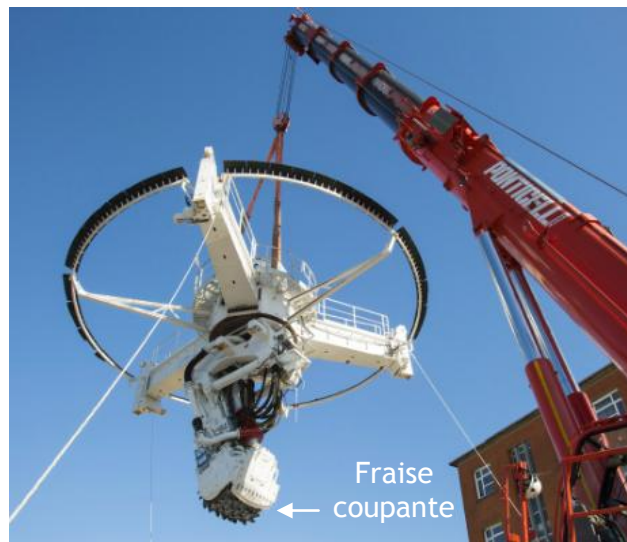


Figure 36 : Tunnelier vertical en installation à Malakoff (Hauts-de-Seine) ; on peut apercevoir la fraise coupante, source [21]

La présence d'une nappe phréatique au milieu du puits n'est ici pas un problème, puisque l'outil est prévu pour travailler sous l'eau afin de minimiser la pression du sol sur les parois verticales

(figure 37). Lorsque le puits est excavé, la base du puits, appelée radier, est coulée et du mortier est injecté entre la paroi verticale et le sol. Une fois ces matériaux durcis, il suffit de pomper l'eau contenue dans le puits, les voussoirs assurent l'étanchéité du puits. C'est ici tout l'intérêt de cette technique par rapport à une construction avec des parois moulées qui est plus complexe et plus longue notamment si le puits traverse une nappe phréatique.

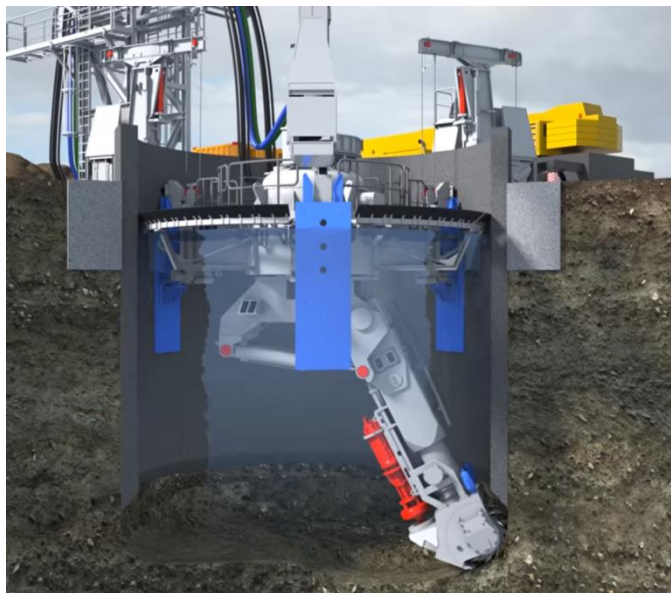


Figure 37 : Schéma du tunnelier vertical creusant dans un puits rempli d'eau, source [22]

La vidéo « [Shaft sinking equipment - Herrenknecht VSM](#) » [28] permet de visualiser les différentes étapes du forage d'un puits vertical (commentaires en langue anglaise).

4 – L'achèvement du métro

Une fois le tunnel construit, la ligne de métro est encore loin d'ouvrir. De nombreux aménagements sont nécessaires avant d'y accueillir les voyageurs.

En premier lieu, il faut poser les voies de chemin de fer. Deux types de roulements seront utilisés : pneu ou fer. La ligne 14 utilisera un roulement sur pneus. L'ensemble de la force motrice est transférée à des roues équipées de pneumatiques roulant sur un système de guidage, comme un rail large en acier ou une dalle de béton. Quand aux autres lignes, elles utiliseront un roulement fer, c'est-à-dire avec deux rails fins parallèles posés sur du ballast.

Par ailleurs, les stations doivent être aménagées (figure 38). Il faut construire les quais avec portes palières, portes vitrées qui s'ouvrent automatiquement lorsqu'un train est à quai, les escaliers, installer les ascenseurs, les portiques à l'entrée, aménager les locaux commerciaux et les zones de vie du personnel. Il faut également installer tous les équipements techniques de ventilation, courants fort et faible. Un traitement paysager en surface sera aussi effectué pour certaines stations. La station doit par ailleurs être raccordée aux réseaux d'eau et d'électricité. Ces travaux durent au minimum un an.

Enfin, l'ensemble de la ligne sera mise sous tension et les rames seront installées. Ces dernières sont toutes livrées et mises sur rails dans des centres de maintenance et de remisage (figure 39) où elles sont stockées et seront entretenues. Il faut ensuite réaliser la phase de marche à blanc afin de tester les capacités de la ligne, phase durant entre 6 mois et un an. Les trains y circuleront aux horaires prévus dans le plan de ligne sans toutefois recevoir de passagers. Ceci permet d'effectuer certains réglages, de corriger d'éventuels défauts de constructions nuisibles à la bonne circulation des trains et de former les équipes en charge de l'exploitation.

La ligne pourra alors être inaugurée. Les prochains kilomètres de métro qui seront ouverts à la circulation seront sur la ligne 14, au nord de Paris, entre les stations Saint-Lazare et Mairie de Saint-Ouen (décembre 2020 est la date actuellement prévue, avec plusieurs années de retard par rapport au projet initial [23]).



Figure 38 : Achèvement de la « boîte » de la future station Aimé Césaire, mai 2018, ligne 12 à Aubervilliers en Seine-Saint-Denis, source [24]



Figure 39 : Vision d'architecte du futur Site de Maintenance et de Remisage (SMR) de la ligne 14 à Saint-Ouen en Seine-Saint-Denis, source [25]

5 – Conclusion

Le projet du Grand Paris Express devrait révolutionner les transports publics en Île-de-France, par les possibilités nouvelles qu'il offrira. Fruit d'une longue réflexion, il devrait transformer la logique des déplacements en Île-de-France, le passage par Paris ne devenant plus obligatoire. Il permettra également le raccordement au réseau des transports de territoires, et ainsi laissera la possibilité d'un déplacement commun plutôt que routier solitaire.

Chaque ligne nouvelle sera construite en 8 ans minimum et la construction utilisera des techniques avancées, des tunneliers les plus récents aux systèmes de surveillance d'affaissement du sol par satellite. Au défi technique s'ajoute un défi logistique : la perspective des Jeux Olympiques de 2024, le respect des coûts sont des facteurs rendant le projet encore plus exigeant. L'avenir dira si le défi a été relevé avec succès.

Références :

[1]: Grand-Paris : le premier tronçon de la ligne 14 est terminé ! 2016, <https://www.constructioncayola.com/rail/article/2016/05/12/105719/grandparis-premier-troncon-ligne-14-est-termine>

[2]: Les étapes de construction d'une gare du Grand Paris Express, <https://www.youtube.com/watch?v=-r40QF8euSY>

[3]: <https://www.societedugrandparis.fr/gpe/actualite/lhistoire-des-tunneliers-si-deroulait-la-bobine-1658>

[4]: Vidéo Société du Grand Paris, <https://www.youtube.com/watch?v=50-mHn2zQll>

- [5]: <https://www.societedugrandparis.fr/gpe/actualite/le-premier-tunnelier-du-grand-paris-express-1654>
- [6]: <https://www.calcia-infos.fr/produits-services/5-600-voussoirs-sous-le-rhone>
- [7]: Dossier du CETU (Centre d'Etudes des Tunnels), <http://www.outils-cetu.fr/didactu/tunnel/materiaux/Le%20b%E9ton/Anneauxetvoussoirs.html>
- [8]: <https://www.unjourdeplusaparis.com/paris-reportage/histoire-metro-paris>
- [9]: http://www.metro-rennes-metropole.fr/accueil/sinformer/photos/25_87/tranchee_couverte_sud_juin_2015_terrassement_en_taupe
- [10]: Dossier du CETU, 1998, <http://www.cetu.developpement-durable.gouv.fr/genie-civil-a572.html>
- [11]: L'interminable retard du chantier de la ligne 14 du métro parisien, 2017, <http://www.lefigaro.fr/societes/2017/02/12/20005-20170212ARTFIG00092-l-interminable-retard-du-chantier-de-la-ligne-14-du-metro-parisien.php>
- [12]: https://educnet.enpc.fr/pluginfile.php/8827/mod_resource/content/0/2011-2012/ENPC_CHEBAP_Ouvrages_souterrains_les_tunneliers_1.pdf
- [13]: Système de guidage pour tunneliers, Deicke, Reinhard, édition <http://www.e-periodica.ch>
- [14]: Cours de Matériaux (SAPH-102), S. Pommier, ENS Paris-Saclay
- [15]: L.Vulliet, L.Laloui, J.Zhao, Mécanique des sols et des roches, Presses polytechniques et universitaires romandes
- [16]: <http://www.placoplatre.fr/L-ENTREPRISE/Carrieres-de-gypse/Carriere-de-Cormeilles-en-Parisis>
- [17]: <https://www.societedugrandparis.fr/gpe/actualite/tout-savoir-sur-le-grand-paris-express-et-les-carrieres-1807>
- [18]: <https://www.youtube.com/watch?v=cljMrfITdO4>
- [19]: <https://www.societedugrandparis.fr/info/gestion-et-valorisation-des-déblais>
- [20]: https://www.youtube.com/watch?v=EpCmWJI_vmk
- [21]: Société du grand Paris, <https://www.societedugrandparis.fr/gpe/>
- [22]: <https://www.herrenknecht.com/en/products/core-products/tunnelling/vertical-shaft-sinking-machine-vsm.html>
- [23]: Prolongement de la ligne 14 du métro : ouverture repoussée à l'été 2020, 2017, <http://www.leparisien.fr/paris-75/metro-la-mise-en-service-de-la-ligne-14-repousee-a-l-ete-2020-19-12-2017-7461558.php>
- [24]: <https://www.prolongement-metro12.fr/les-travaux-en-cours-metro-12/>
- [25]: <http://www.prolongerligne14-mairie-saint-ouen.fr/les-grandes-lignes-du-projet/les-nouveaux-amenagements/>

[26]: Le Grand Paris Express : construire 200 km de métro, T. Klaeylé, X. Jourdain, H. Horsin Molinaro, ressource Culture Sciences de l'ingénieur, http://eduscol.education.fr/sti/si-ens-paris-saclay/ressources_pedagogiques/le-grand-paris-express-construire-200km-de-metro

[27]: Le Grand Paris Express : la ligne 18, T. Klaeylé, X. Jourdain, H. Horsin Molinaro, ressource Culture Sciences de l'Ingénieur, http://eduscol.education.fr/sti/si-ens-paris-saclay/ressources_pedagogiques/le-grand-paris-express-la-ligne18

[28]: <https://www.youtube.com/watch?v=HCDsFlqIfA0>

[29] : <https://elancourt.fr/mes-loisirs/squares-et-espaces-verts/baladez-vous-a-elancourt>

Ressource publiée sur Culture Sciences de l'Ingénieur : <http://eduscol.education.fr/sti/si-ens-paris-saclay>