



ÉCOLE NATIONALE SUPÉRIEURE DES MINES DE PARIS

RAPPORT DE M.I.G.

Mig Grand Paris

Caroline ADAMY, Rongzhou BAO,
Godefroy BICHON, Pierre BOSSUET
Jules BRESSAN, Sacha CLESCA,
Jimmy el FERESH, Federico FORTIS,
Thomas GILLET, Jérémie NICOLAS,
Théo PHANTAY, Victor RENARD,
Louis RÉPUSSARD, Baptiste RÉROLLE

Professeurs Encadrants :
Damien GOETZ
Emad JAHANGIR

Promotion 2018

Novembre 2018 — Décembre 2018

Remerciements

Il était loin le soleil de Sophia. Pourtant nous l'avons apprécié ce « mig boue ». Nous aimerions donc remercier Damien Goetz et Emad Jahangir de nous avoir supporté, dans la Nissan ou le Trafic, ou bien pendant les deux semaines bellifontaines. Nous sommes heureux d'avoir pu bénéficier de leur expertise scientifique, d'avoir découvert le McDo' de Châtillon en Michaille et d'avoir profité de leur bonne humeur pendant ces trois semaines. Nous avons ri, un peu trop parfois, mais surtout beaucoup appris grâce à eux. Tout cela dans l'esprit de notre devise : « Théorie et Pratique ».

Merci également à Mohammed Abid et Benjamin Kitzi de Bouygues Construction, à Nicolas Janicaud de Bouygues Tunnel Lab, à Mark Noble et Hervé Chauris du centre de recherche de Fontainebleau pour leurs interventions et leur implication dans notre projet.

Ce MIG restera pour nous une expérience formidable.



Table des matières

Remerciements	0
Mise en contexte	1
I Avancer dans le tunnel : techniques et optimisation	3
1 Présentation du fonctionnement du tunnelier	3
1.1 Présentation générale de la machine	3
1.2 Déroulement du creusement avec un tunnelier	3
1.3 Installation du tunnelier sur un chantier	4
1.4 Confinement du tunnelier	4
1.4.1 Nécessité du confinement	4
1.4.2 Présentation des deux principaux modes de confinement	5
1.5 Tunnelier choisi pour le lot T2A	5
2 Prévision des paramètres opératoires : pression et confinement	6
2.1 Techniques de confinement	6
2.2 Critères de choix du mode de confinement sur le projet T2A	6
2.3 Calcul des contraintes	7
2.3.1 Contraintes dues à la nature géologique des terrains	7
2.3.2 Pression hydrostatique	7
2.3.3 Charge des bâtiments en surface	7
2.4 Synthèse sur le lot T2A	8
2.4.1 Prévision du mode de confinement et contraintes dans le terrain	8
2.4.2 Conséquences des choix techniques	9
2.5 Bilan	9
3 Optimisation logistique : gestion du temps et des données	10
3.1 Identification des besoins du tunnelier	10
3.1.1 Les consommables	10
3.1.2 Approvisionnement en consommables	10
3.2 Mise en corrélation avec les phases de fonctionnement	11
3.2.1 Optimisation de la phase de pose des conduites	12
3.3 Utilisation des données pour optimiser la pose d'anneaux	13
3.3.1 Caractérisation du cycle de pose d'un anneau	14
3.3.2 Classification des cycles de pose d'anneaux	15
3.3.3 Traitement des données	15
3.4 Bilan	16
II Impacts et Risques	17
4 Risques : départ et arrivée du tunnelier dans une gare	17
4.1 Présentation des risques	17
4.1.1 Rôle du mortier	17
4.1.2 Risque en entrée/sortie d'une gare	17
4.2 Détection d'un vide dans le mortier	18
4.2.1 Choix de la méthode de détection des vides	18
4.2.2 Méthode sismique : principe de simulation	18
4.3 Modélisation et analyse des résultats	18
4.3.1 Détection théorique du vide	18
4.3.2 Simulation d'un cas simple	18

4.3.3	Simulation d'un cas plus réaliste	19
4.3.4	Application du modèle théorique au cas réel	19
4.3.5	Limites de l'approche	20
4.4	Autres approches	20
4.5	Bilan	20
5	Les chantiers du Grand Paris Express et l'environnement	21
5.1	Encadrement légal et réglementations	21
5.2	Diagnostic environnemental	21
5.2.1	Impacts sociaux	21
5.2.2	Impacts écologiques	23
5.3	Bilan	24
6	Gestion des déblais	25
6.1	Les déblais du Grand Paris Express	25
6.1.1	Estimation du volume de déblais	25
6.1.2	Qualité des déblais	25
6.1.3	Possibilité d'évacuation des déblais du Grand Paris Express en Île-de-France	25
6.2	Étude de cas : la carrière de Voutré comme site d'accueil des déblais	26
6.2.1	Coût du transport	26
6.2.2	Transport et déchargement sur le site de Voutré	27
7	Bilan carbone et évaluation	29
	Conclusion	30

Mise en contexte et introduction

La métropole parisienne est en pleine transformation. Dans le cadre du projet du Grand Paris, de nouvelles lignes de métro sont construites en banlieue dans le but de désengorger les réseaux de transport actuels et de faciliter la mobilité intercommunale.

L'étude présentée rentre dans le cadre du projet de développement du Grand Paris (figure 1). Il s'agit d'un projet pensé depuis plus de 10 ans par le gouvernement français, afin de faire de Paris et de la région parisienne des zones plus attractives, sur les plans économique, social et environnemental. Ainsi, l'État veut se doter d'une métropole d'envergure mondiale, compétitive dans la mondialisation, mais aussi soucieuse des enjeux du développement durable.

Ce projet comporte de nombreuses facettes parmi lesquelles l'élargissement du réseau de transport public joue un rôle central. L'objectif est de désengorger les routes et de minimiser les temps de trajet dans l'agglomération parisienne.

Ces dernières années, la ville de Paris et son agglomération se sont par ailleurs portées candidates à l'accueil de grands événements mondiaux comme la COP 21 qui a eu lieu en 2015 ou les Jeux Olympiques de 2024 qui lui ont été attribués. L'organisation de ces événements rentre dans cette même logique de rayonnement international mais aussi de revalorisation de certaines parties de la banlieue, et impose évidemment des délais pour le déploiement des nouvelles lignes de métro et de RER. Les instances dirigeantes espèrent par exemple pouvoir proposer aux dizaines de milliers de touristes qui arriveront en France pour les Jeux Olympiques un réseau de transport de grande qualité : prolongement de la ligne 14 jusqu'à l'aéroport d'Orly, arrivée du métro au Bourget via les futures lignes 16 et 17.

S'il n'est pas prévu que la ligne 15 (figure 2) ouvre avant les Jeux Olympiques, elle n'en reste pas moins une des clés du Grand Paris Express. En effet, ce futur métro automatique fera le tour de Paris et desservira 36 stations dans les 3 départements de la petite couronne parisienne, sur une distance totale de 75 km. Reliée au réseau RATP déjà existant et aux futures lignes du Grand Paris Express, elle permettra ainsi de diminuer significativement tous les trajets de banlieue à banlieue, puisqu'elle évitera de passer par Paris pour changer de ligne de métro. A titre d'exemple, le trajet entre Issy-les-Moulineaux et Arcueil-Cachan dure actuellement 46 minutes, et nécessite 2 correspondances pour deux gares distantes de 8 km et dont le trajet en voiture dure 25 minutes, alors que la ligne 15 offrira un trajet de 9 minutes en passant par 4 gares seulement.

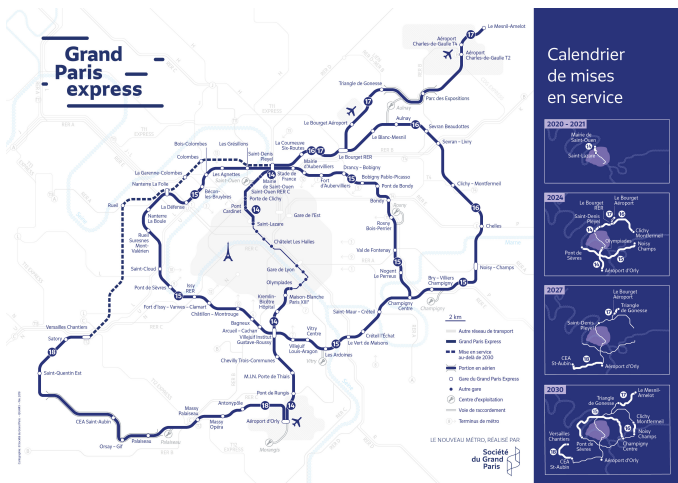


FIGURE 1 – Plan du futur réseau du Grand Paris Express

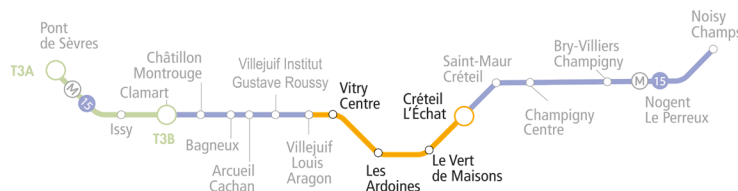


FIGURE 2 – Plan de la ligne 15 Sud

La ligne 15 aura donc le double avantage de désengorger les routes et les transports publics dans Paris, mais aussi d'inciter les gens à se déplacer en métro, et donc de limiter les émissions de dioxyde de carbone dans l'atmosphère.

En considérant la taille de cette ligne, il a été choisi par la société du Grand Paris de la construire en

plusieurs lots, afin de pouvoir faire des travaux à plusieurs endroits à la fois. La réalisation de chaque lot a été attribuée à différents groupements d'entreprises suite à des appels d'offres.

Dans le cadre de notre MIG, nous nous sommes intéressés à la ligne 15 Sud, et plus particulièrement au lot T2A, qui reliera Villejuif-Louis Aragon à Créteil-L'Échat. Ce chantier est assuré par le groupement d'entreprises Horizon, dirigé par Bouygues TP, et comportant Soletanche Bachy France, Soletanche Bachy Tunnels, BESSAC et SADE.

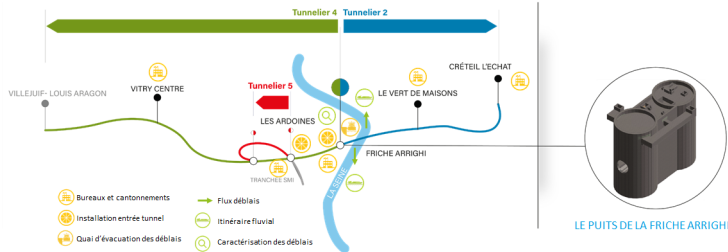


FIGURE 3 – Tracé du chemin des tunneliers

construction de la structure en béton du tunnel.

Un tunnelier mesure une centaine de mètres de long car en plus de la partie effective située à l'avant du tunnelier (la tête), les différents besoins logistiques sont assurés par la partie arrière du tunnelier (le train suiveur). Dans le cas du creusement du lot T2A, les tunneliers sont fabriqués par l'entreprise allemande Herrenknecht, leader européen de la fabrication de tunneliers.

En plus des problèmes purement techniques de fonctionnement du tunnelier, d'autres enjeux logistiques, sociaux ou environnementaux s'imposent et font de ce chantier un véritable défi à toutes les échelles.

Notre travail s'est donc porté d'une part sur le chantier qui constitue le tunnelier en creusement, l'aménagement du site en surface et son intégration dans son environnement, d'autre part sur la gestion des déblais excavés en tunnel et l'impact environnemental du chantier. Pour avoir une vision d'ensemble du sujet, nous avons fait cheminer notre réflexion depuis le tunnel en creusement vers le monde extérieur.



FIGURE 4 – Tête d'un tunnelier

Dans une première partie consacrée à **la mise en œuvre et l'avancement du chantier** :

- nous déterminons le type de confinement qui doit être utilisé en fonction du tronçon que creuse le tunnelier, et nous calculons le profil de pression de confinement à appliquer en tête de tunnelier pour maintenir le front de taille,
- nous étudions la logistique du chantier dans une optique d'optimisation du temps,
- nous réfléchissons aux opportunités fournies par le traitement des données collectées par les capteurs du tunnelier pour optimiser la logistique en tunnel et l'ajustement des paramètres de creusement.

Dans une seconde partie concernant **l'impact environnemental du chantier et les risques qu'il met en jeu** :

- nous cherchons comment détecter les vides liés à une mauvaise injection de mortier autour du tunnel qui pourraient mettre en péril la stabilité de la surface,
- nous observons et évaluons les impacts qu'a le chantier sur son environnement,
- et enfin nous établissons un bilan des conséquences écologiques d'un tel chantier, tant par ses impacts directs que par ses émissions de CO₂.

Première partie

Avancer dans le tunnel : techniques et optimisation

1 Présentation du fonctionnement du tunnelier

1.1 Présentation générale de la machine

Le tunnelier est une machine permettant **l'excavation de terrains et la construction de tunnels** dans des sols variés. Il est utilisé comme alternative à la méthode d'excavation à l'explosif dite « traditionnelle ». Les tunneliers présentent l'avantage de **limiter les perturbations sur leur environnement proche** (les rendant particulièrement adaptés aux zones urbanisées comme celles rencontrées sur le Grand Paris Express) ainsi que de **creuser plus rapidement**. Cependant, ces machines ont un coût initial de construction et de transport élevé de sorte qu'ils ne sont pas rentables sur de courts tronçons (moins de 1,5 km environ) car chaque tunnelier est propre à un tunnel. Ces tunnels circulaires ont des diamètres pouvant aller de 1 à plus de 17 mètres. Dans le cas du lot T2A, les tunnels creusés ont un diamètre intérieur de 8,70 mètres et une longueur de 2 757 mètres et de 4281 mètres respectivement pour les tunnels de part et d'autre de La friche Arrighi jusqu'à Créteil l'Echat et Villejuif-Louis Aragon.

Il existe différents types de tunneliers plus ou moins adaptés à la **géologie rencontrée** sur la zone à creuser, à la **cadence attendue** et à la **logistique et l'organisation du chantier**. De plus, ils ont des coûts financiers et énergétiques d'utilisation différents.

Un **cycle d'avancement** du tunnelier se décompose en deux phases qui se répètent. Le **tunnelier creuse** sur la longueur d'un anneau, puis il **pose un anneau** sur le diamètre du tunnel. Les anneaux sont le revêtement définitif du tunnel. Le tunnelier alterne entre ces deux modes.

1.2 Déroulement du creusement avec un tunnelier

Un tunnelier se compose de trois parties principales : le bouclier qui creuse et assure le confinement, la jupe qui pose les anneaux et le train suiveur (figure 5). Le bouclier mesure une dizaine de mètres et l'ensemble une centaine de mètres. Le train suiveur avance dans la partie du tunnel qui a déjà été construite par le tunnelier.

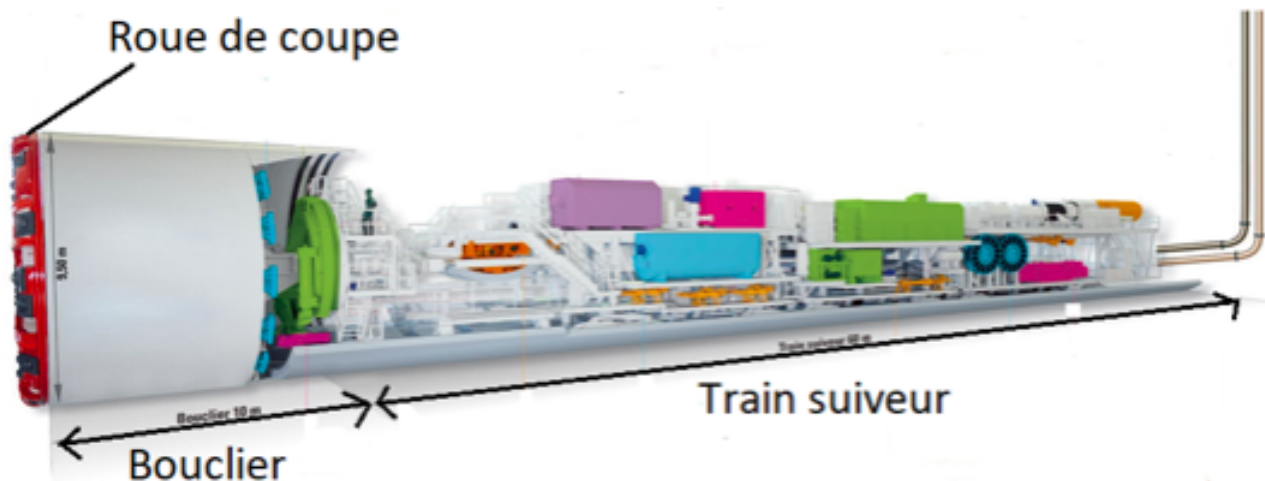


FIGURE 5 – Vue de profil d'un tunnelier

La **roue de coupe** est située en tête du tunnelier. Elle effectue une rotation au contact de la roche à environ 2 tours par minutes. Elle se compose de molettes, de racleurs et de couteaux permettant de fissurer et de fracturer la roche. L'écart entre ces outils est tel que les morceaux de roche excavés soient suffisamment petits pour s'infiltrer dans le tunnelier par les espaces laissés à cet effet dans la roue de coupe.

Le **bouclier** situé immédiatement derrière la roue de coupe abrite les **vérins de poussée**, ainsi que le **système de pose des anneaux**, le revêtement final du tunnel. Les 14 paires de vérins de la machine poussent sur le revêtement déjà posé du tunnel pour faire avancer le tunnelier en imposant une force de poussée à la roue de coupe (environ du kiloNewton). La vitesse de creusement est de l'ordre de 8 cm/min.

Lorsque le tunnelier a creusé ce qui correspond à la longueur d'un anneau, celui-ci passe en mode pose d'anneau. Un **anneau** est de forme circulaire, long d'1m80, constitué de béton ferraillé. Il se compose de **7 voussoirs** placés les uns après les autres et dont le placement du dernier, **la clé**, donne au tunnel sa trajectoire (figure 6). **L'érecteur** situé dans le bouclier récupère un voussoir. Deux paires de vérins du tunnelier sont rétractés laissant la place à l'érecteur pour venir placer le nouveau voussoir. Une fois le voussoir placé, les deux paires de vérins plaquent le voussoir contre l'anneau précédent. L'opération se répète pour les 6 voussoirs suivants, puis le tunnelier passe nouveau en phase de creusement.

Le tunnel excavé possède un diamètre légèrement supérieur à celui des anneaux. Il est nécessaire d'injecter de la matière, en l'occurrence du **mortier**, pour remplir ce **vide annulaire** autour de l'anneau afin d'éviter un tassement des terrains en surface.

Le **train suiveur**, accroché au bouclier, se situe dans les anneaux déjà placés par le tunnelier. Il contient toutes les fonctions restantes du tunnelier, réparties sur différents wagons et permet le stockage des ressources utiles à la machine. Il régit la cabine de pilotage, le caisson de survie, les réserves de voussoirs, d'huiles, de mortier, les conduites, les gaines de ventilation ou encore les pompes. Des trains sur pneus (TSP) permettent d'acheminer les voussoirs et les conduites du puits de départ au tunnelier.

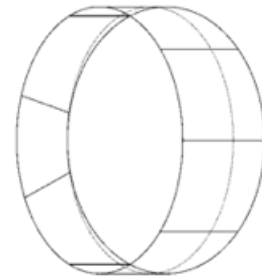


FIGURE 6 – Schéma d'un anneau et ses 7 voussoirs

1.3 Installation du tunnelier sur un chantier

Le tunnelier est monté une première fois dans l'usine pour s'assurer qu'il n'y a pas de pièces manquantes, puis il est démonté. On achemine les pièces détachées sur le site du chantier où il va falloir le monter à nouveau. Cette opération nécessitant beaucoup de place, il faut creuser **un puit** duquel partira la machine ; il s'agit du puits de la friche Arrighi pour le lot T2A.

La première étape consiste à réaliser **les parois moulées** en surface du chantier, qui vont définir l'enceinte du puits. Plusieurs machines permettent de définir la profondeur du creusement et l'épaisseur des parois, puis on injecte de la **bentonite** et on extrait la terre. On place ensuite **l'armature métallique** dans le trou et on coule le ciment dans l'espace ainsi formé. Il faut impérativement que ces parois soient étanches, autrement le terrain risque de s'y infiltrer et de provoquer un fontis. Après cela, on creuse l'intérieur délimité par ces nouvelles parois de sorte à former le puits. Lors de cette opération, on place régulièrement des piliers afin de soutenir les parois. Nous avons pu observer la pose de ces parois lors de notre visite d'un chantier du groupe Razel-Bec sur le prolongement de la ligne 14 sud. Enfin, on réalise le radier, plateforme en béton, sur laquelle sera posé le tunnelier.

1.4 Confinement du tunnelier

1.4.1 Nécessité du confinement

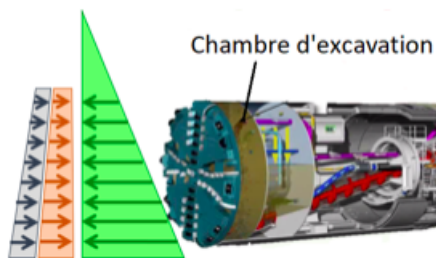


FIGURE 7 – Profil de pression du terrain compensé par le profil imposé dans la chambre d'abattage

La tête du tunnelier (figure 7) est soumise à un champ de pression dû à la fois à la profondeur à laquelle le tunnelier opère, aux bâtis en surface (en rouge) et à la contrainte hydrostatique c'est-à-dire l'influence de l'eau contenue dans les terrains (en bleu). Le tunnelier doit donc opposer un profil de pression proche pour éviter que le terrain ne s'éboule et ne se tasse. Le risque en cas de mauvaise gestion du confinement est de provoquer du tassement différentiel en surface, une différence de tassement entre deux extrémités d'un bâtiments, ce qui risque de déstabiliser la structure, ou dans un cas extrême un fontis.

1.4.2 Présentation des deux principaux modes de confinement

Pour imposer une certaine pression au niveau de la chambre d'abattage ou chambre d'excavation situé immédiatement derrière la roue de coupe, il existe deux principaux modes de confinement :

- **Les tunneliers à pression de terre** (figure 8). La roue est en contact direct avec le sol qu'elle creuse. Celui-ci rentre dans la **chambre d'abattage** où il est maintenu afin de créer la pression de confinement. Il est ensuite évacué à l'aide d'une **vis d'Archimède**, dont la vitesse de rotation sert à réguler le débit d'évacuation, et donc la pression en tête de tunnelier. Une fois sortie, cette boue est directement transportée à l'aide d'un **convoyeur** jusqu'au chantier en surface, où des camions l'apporteront dans un lieu approprié.

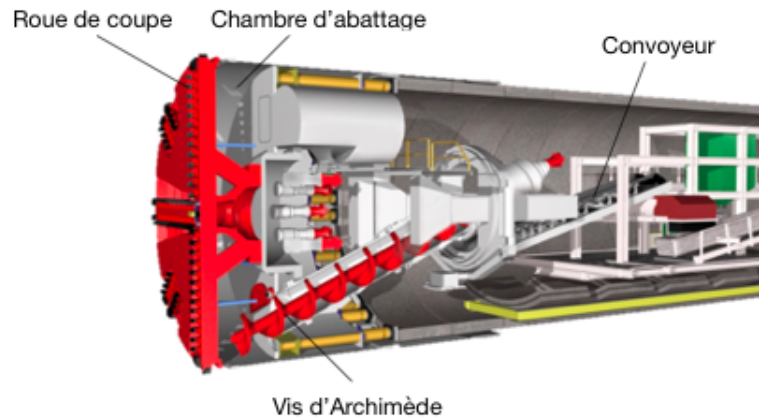


FIGURE 8 – Avant d'un tunnelier avec confinement à pression de terre

- **Les tunneliers à pression de boue** (figure 9). On apporte de la boue bentonitique (qui se gélifie lorsqu'elle n'est pas agitée), depuis une station de fabrication, dans la chambre d'abattage. On peut réguler son niveau, couplé à de l'**air comprimé**, afin d'obtenir le profil de pression désiré, puisque la pression augmente avec la profondeur de la boue. De la boue est également injectée dans le sol afin de créer un **cake** (mélange de sol et de boue) que l'on va creuser. Les déblais obtenus sont donc un mélange boueux qui est transporté dans des conduites de marinage jusqu'à la **Station de Traitement des Boues (STB)**, présente sur le chantier. Celle-ci sert à filtrer la boue pour extraire la partie plus fine, réutilisable, pour limiter la quantité de déblais, de la partie à éliminer par camion.

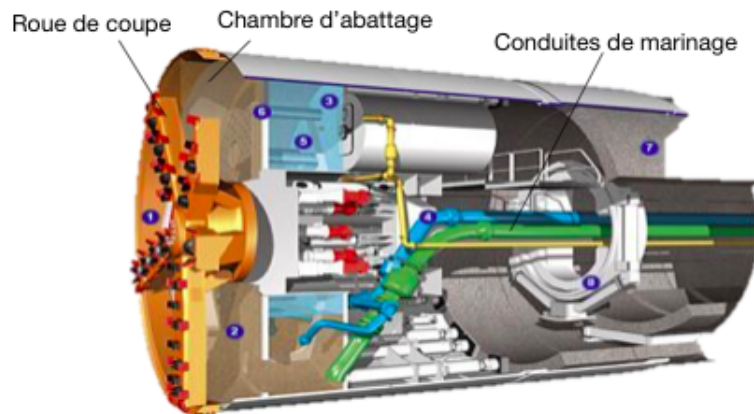


FIGURE 9 – Avant d'un tunnelier avec confinement à pression de boue

1.5 Tunnelier choisi pour le lot T2A

Le tunnelier choisi pour le lot T2A est un **tunnelier à densité variable**. Il s'agit d'un hybride entre un tunnelier à pression de terre et à pression de boue. La chambre d'abattage est remplie d'un mélange de boue et de sol excavé présentant un gradient de pression dû à la différence de hauteur dans la roue. Le réglage de la densité de la boue par ajout de boue très dense permet d'ajuster la pente de ce profil de pression. Le réglage de la pression dans la chambre précédente par ajout d'air comprimé, permet de fixer la pression à une altitude donnée de la chambre d'abattage. On fixe ainsi d'une part la pente du profil de pression et d'autre part sa composante continue. La partie excavée est ensuite évacuée par la vis d'Archimède puis, après avoir été concassée, est réinjectée dans le circuit de marinage pour être traitée dans la station de traitement des boues en surface.

2 Prédiction des paramètres opératoires : pression et confinement

2.1 Techniques de confinement

Le sol est soumis à des contraintes verticales et horizontales. Si on ne compense pas ces contraintes au front lors du creusement du tunnel, **le sol au front s'écroule**, générant un tassement en surface. Ce phénomène est particulièrement dangereux dans les zones urbaines, où l'on trouve des structures parfois très sensibles (voies ferrées, hôpitaux etc.). Les tunneliers à front confiné permettent de faire face à cette situation. Leur fonctionnement est le suivant : à l'avant du tunnelier se trouve une chambre dans laquelle entrent les déblais par la roue de coupe, où règne un profil de pression de confinement contrôlé permettant de compenser les contraintes du terrain. Pour gérer ce profil de pression, on utilise ici **deux modes de confinement** : le confinement à pression de **boue** et le confinement à pression de **terre**.

Les tunneliers du projet T2A de la ligne 15 Sud fonctionnent en réalité suivant un mode nouveau : **la densité variable**. Nous avons mené notre étude en considérant que le tunnelier fonctionne de façon **binaire** : il passe d'un mode de confinement à l'autre (boue ou terre) pendant son avancement, et ce sans intermédiaire.

Il est important de signaler que la pression de confinement a pour objet d'assurer la stabilité du sol et est **indépendante de la force que la roue de coupe applique sur le terrain au front**, celle-ci ne servant qu'à faire avancer le tunnelier.

2.2 Critères de choix du mode de confinement sur le projet T2A

On s'intéresse uniquement aux critères discriminants permettant de choisir le mode le plus intéressant.

Pression de boue :

- Applique un profil de pression bien maîtrisé, à gradient constant.
- Un terrain **trop perméable, soluble, hétérogène** (vides, karsts, blocs) **pas assez cohésif** induit un risque d'écoulement du liquide bentonitique dans le sol, donc de perte du confinement.

Ainsi, **une granulométrie trop grossière** n'est donc pas adaptée car la très forte perméabilité qui lui est associée conduit à la perte de la boue dans le terrain.

Pression de terre :

- **Profil de pression moins bien contrôlé**, mais la viscosité élevée, ou même la plasticité des sols, éliminent les risques de pertes de confinement.

Pour le lot T2A, les tunneliers étant à densité variable, on utilise dans les deux cas la boue bentonitique pour **évacuer** les déblais. Le traitement de la boue qui est nécessaire dans les deux modes de confinement, **n'a donc pas été un critère discriminant dans notre approche**.

Nous avons en conséquence mené une étude du terrain pour **déterminer quel mode de confinement favoriser** en fonction de l'avancement le long du tracé du tunnel, prenant en compte les caractères génériques évoqués ci-dessus, **la perméabilité, la granulométrie, la cohésion du terrain**, mais aussi les conditions particulières du terrain (structures en surface, passage sous la Seine...). Par exemple, des terrains perméables sont défavorables au confinement par pression de boue car celle-ci peut s'échapper dans le terrain. Un terrain peu cohésif est défavorable à un confinement à pression de boue : la boue peut s'infiltrer dans les vides créés pendant l'avancement. Le détail de l'étude sur la totalité du lot T2A se trouve en **annexe [2]** ainsi que l'influence de ces paramètres sur le choix de confinement. Nous avons extrait nos données et mené tous nos calculs et raisonnements sur la section creusée par le groupement Horizon de Villejuif jusqu'à la friche Arrighi, représentée sur la figure "Tracé en plan et profil en long" fournie par la Société du Grand Paris en **annexe [1]**.

Prenons un **exemple** qui se situe au point métrique 104,65 sur le profil pour illustrer notre **méthode de choix du mode de confinement** (les **valeurs seuils** qui nous permettent de choisir le mode de confinement sont décrites en **annexe [2]**).

Au point **104,65** : on se situe dans des marnes et caillasses, avec comme caractéristiques :

- **Perméabilité** : $10^{-5} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, donc inférieur à $10^{-4} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$
- **Granulométrie** : 80% d'extra-fines ($< 63 \mu\text{m}$), 20% sables ($63 \mu\text{m} < 6\text{mm}$)
- **Cohésion** : 180 kPa donc supérieur à 100 kPa

C'est donc un terrain avec un fort taux de particules fines, peu perméable et cohésif, qui porterait a priori notre choix vers un confinement à boue. Mais on repère dans ces marnes la présence de **vides** qui force l'utilisation d'un confinement à pression de **terre**.

Avec ce mode de raisonnement nous pouvons déterminer quel mode de confinement choisir pour appliquer dans la chambre d'abattage le profil de pression qui va assurer la stabilité du sol lors de l'avancement. Maintenant, il nous faut connaître quantitativement la pression à appliquer dans la chambre d'abattage. Pour cela, sur la base des trois paramètres principaux que sont la nature géologique des terrains, la présence d'une nappe d'eau, et les bâtiments en surface, nous calculons la contrainte horizontale du terrain au front du tunnelier qui va être celle que l'on va chercher à compenser.

2.3 Calcul des contraintes

Pour mener les calculs, nous avons proposé plusieurs modèles et hypothèses permettant de simplifier le problème. Le raisonnement détaillé est fourni en **annexe [3]**.

2.3.1 Contraintes dues à la nature géologique des terrains

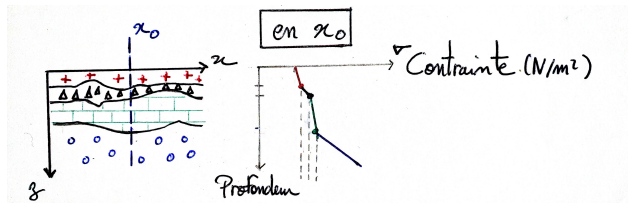


FIGURE 10 – Évolution de la contrainte dans un sol multicouche

Le bassin parisien présente différentes **couches géologiques**, de **poinds volumique (à sec et déjaugé, notions développées en annexe[3])** et **profondeur variables**. Nous avons pris en compte ces paramètres pour calculer les contraintes qu'ils engendrent.

2.3.2 Pression hydrostatique

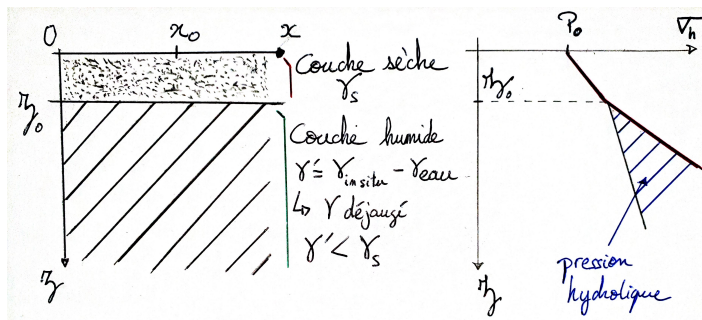
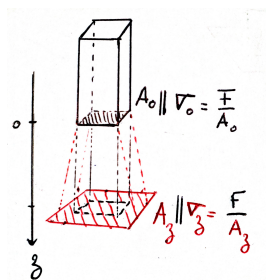


FIGURE 11 – Évolution de la contrainte avec la présence d'une nappe d'eau

Dans le bassin parisien, le haut de la **nappe d'eau** se situe à quelques mètres de la surface, à une profondeur variable. Le tunnelier se trouve donc toujours sous celle-ci. Il faut ajouter la charge qu'elle impose sur le front d'avancement du tunnel.

Pour une couche située en dessous de la nappe d'eau, on considère le poids volumique déjaugé du matériau γ' , égal à la différence entre son poids volumique *in situ* (en état), et le poids volumique de l'eau. Ceci s'explique par le fait que l'eau absorbe une partie de la contrainte verticale, et la restitue ensuite indépendamment sous forme de contrainte horizontale. On obtient donc une contrainte verticale $\sigma_v = \gamma' h$

2.3.3 Charge des bâtiments en surface



Enfin, les **bâtiments en surface** imposent une charge supplémentaire, d'autant plus importante qu'il y a d'étages. Cette charge se diffuse dans le sol, la rendant moins importante lorsque l'on se situe loin de la surface. En **annexe [3]** nous présentons la méthode de calcul.

Figure 11' - Diffusion de la contrainte générée par un bâtiment en surface

2.4 Synthèse sur le lot T2A

2.4.1 Prévion du mode de confinement et contraintes dans le terrain

Nous avons identifié la nature du terrain dans lequel on évolue et répertorié les structures sensibles en surface pour pouvoir appliquer nos critères de choix sur le mode de fonctionnement du tunnelier avec le raisonnement présenté dans le I.2. Nous schématisons le profil géologique le long du tunnel (fig.12) avec les bâtiments sensibles en surface : la hauteur du bâton représentant un immeuble est proportionnelle à son poids : on voit bien leur impact sur la contrainte horizontale autour des 2000 m de linéaire. On obtient *in fine* la frise du mode de confinement choisi (fig.13).

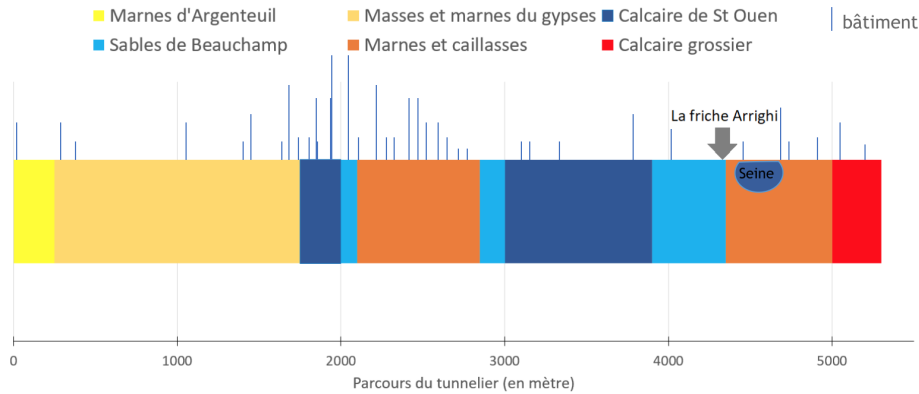


FIGURE 12 – Profil géologique simplifié et bâtiments sensibles en surface

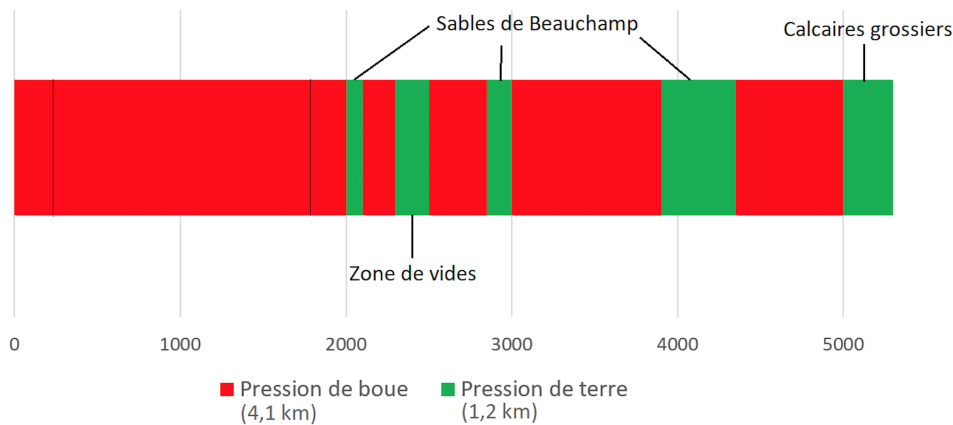


FIGURE 13 – Choix du mode de confinement le long du tunnel

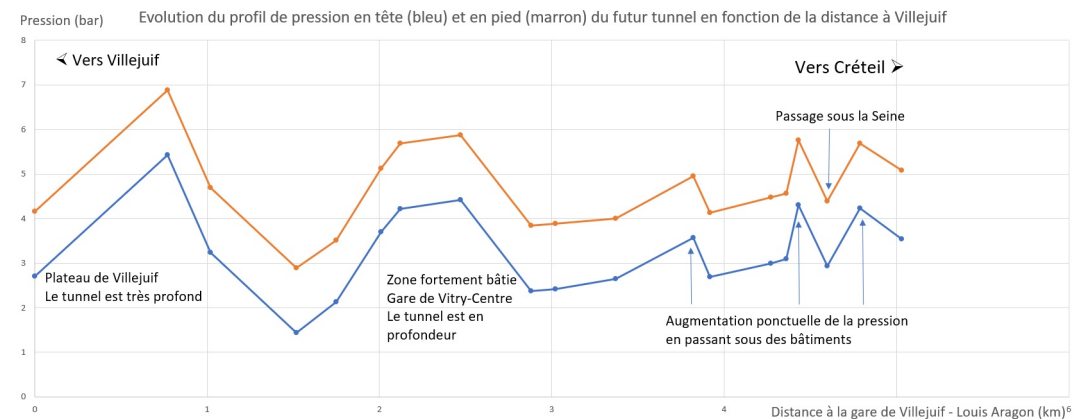


FIGURE 14 – Contrainte horizontale sur le haut (bleu) et sur le bas (marron) du front du tunnelier le long de son avancement

Après calculs, nous obtenons le tracé de la contrainte horizontale au front du tunnelier le long du tunnel (figure 14). C'est ce paramètre opératoire qui permet au pilote de la machine d'anticiper la pression à appliquer dans la chambre d'abattage.

Nous avons donc fait des **choix purement techniques** sur les conditions opératoires et paramètres de creusement à appliquer au cours de l'avancement du tunnelier pour optimiser sa progression. Ces choix ne prennent aucunement en compte la **dimension économique** du projet, mais ont pourtant des **conséquences directes** sur son coût. Cette dernière partie vise à quantifier les conséquences de nos décisions.

2.4.2 Conséquences des choix techniques

	Nos prévisions	+30% de longueur sur les tronçons à pression de terre	Tout le trajet à la pression de terre
Coût énergétique	15 TJ	16 TJ (+7%)	29 TJ (+93%)
Coût financier	15+4,95M€	15+5,18M€ (+1%)	15+8M€ (+15%)
Coût temporel	4144h	4317h (+4%)	5064h (+22%)

Tableau - Coûts financiers, énergétiques et temporels suite aux choix du mode de confinement.

Ce tableau prend en compte la **consommation énergétique** et l'**entretien** (changement des molettes) de la roue de coupe. Les calculs sont précisés en **annexe [4]**. Il met en évidence que l'utilisation du confinement à pression de boue permet de diminuer les coûts énergétiques, financiers et temporels.

Cependant, les calculs supposent que la **station de traitement des boues est déjà installée**, ce qui est le cas pour notre tunnelier à **densité variable**. Or son coût d'installation s'élève à près de **15 M €**. Ce calcul montre que le gain en coûts de creusement (+8 M€ en cas de creusement sur toute la longueur en mode pression de terre) n'est pas suffisant pour justifier le choix initial d'un équipement pouvant fonctionner en pression de boue (+15 M € pour l'unité de traitement de la boue). Par ailleurs, ces chiffres restent faibles en regard, du budget du lot T2A s'élève à **980 M €**. Ces éléments confirment que le choix du mode de confinement est avant tout un choix technique. Il intègre évidemment plus d'éléments que ceux que nous avons pris en compte (en particulier des éléments liés aux risques lors du creusement), ainsi que des questions d'**impact environnemental** (un tunnelier à pression de terre nécessite souvent l'ajout de produits chimiques pour gérer la rhéologie des produits excavés, ce qui peut avoir des conséquences fortes sur l'évacuation des déblais).

2.5 Bilan

Cette sous-partie montre comment nous pouvons anticiper les paramètres de creusement lors de l'avancée du tunnelier, en particulier en choisissant le mode de confinement et la pression dans la chambre d'abattage en fonction de la position du tunnelier, cela grâce à des calculs se basant sur des modèles et hypothèses physiques et géotechniques. Nous avons montré que les choix que nous avons faits ne s'intéressent qu'à la dimension technique, la dimension économique étant largement négligeable dans le choix des paramètres de creusement. Il reste cependant plusieurs paramètres que nous n'avons pas anticipés dans cette sous-partie, en particulier le temps.

3 Optimisation logistique : gestion du temps et des données

Le fonctionnement du tunnelier nécessite de prendre en compte son approvisionnement régulier en **consommables**, en **matériaux**, en **main d'œuvre** ainsi que l'**évacuation de nombreux éléments vers l'extérieur**. Cet ensemble de paramètres impose une **logistique complexe** de gestion des flux dans le tunnel. L'objectif principal de l'étude logistique est d'**optimiser le rapport du temps effectif de creusement sur le temps total de mobilisation du chantier**, afin de garantir des temps de travaux les plus courts possibles. Il faut réaliser le plus d'actions en **temps masqué**, c'est-à-dire pendant que le tunnelier est arrêté pour la pose des voussoirs ou pour des maintenances planifiées.

3.1 Identification des besoins du tunnelier

3.1.1 Les consommables

Le tunnelier est un système complexe dont le bon fonctionnement repose sur l'apport d'un nombre important de **consommables**. De manière générale, nous pouvons distinguer les apports de **matière (flux)**, à travers des conduites déjà installées, parmi lesquels figurent le **marinage** (mélange de bentonite et d'eau formant une boue qui permet l'évacuation des déblais de creusement), **l'air comprimé et l'air de ventilation**, **l'eau de refroidissement et l'exhaure** (eaux usées dues à l'ensemble des activités du tunnelier), **le bi-composant** (composé de mortier et d'accélérateur destiné à combler les vides entre les voussoirs et le terrain). À cela s'ajoute l'apport d'**électricité ou de données** via des câbles. L'ensemble de ces éléments est visible sur la coupe transversale du tunnelier (figure 15).

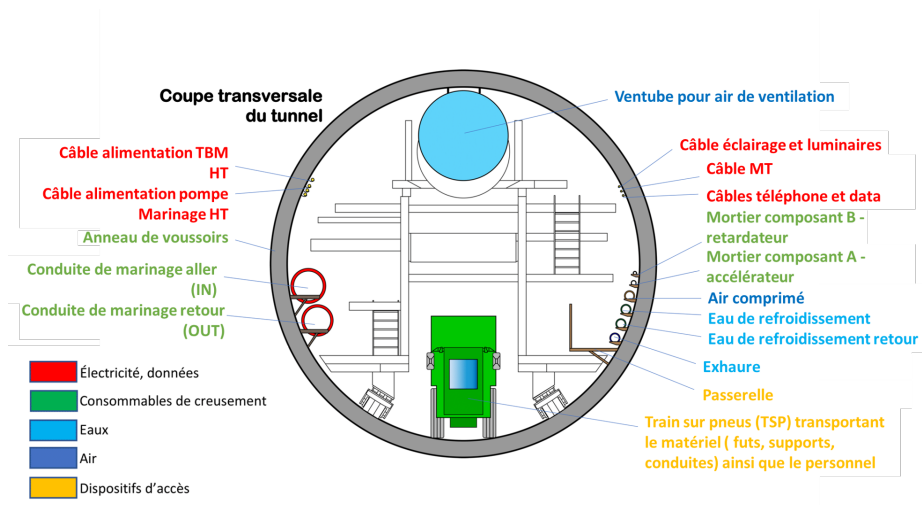


FIGURE 15 – Coupe transversale du tunnel à l'arrière du tunnelier

Afin de garantir l'acheminement de ces consommables, **des câbles, des conduites et des supports pour celles-ci** sont régulièrement amenés à l'arrière du tunnelier pour rallonger les réseaux existants. Une **passerelle d'accès au tunnelier** est également installée le long du tunnel. Son rallongement se fait au niveau de l'arrière du tunnelier où sont amenés **les caillebotis et les plateformes**. Enfin, **d'autres éléments de construction (les voussoirs, les outils de coupe) et de maintenance (futs d'huile et de graisse)** sont également à prendre en compte.

Les différents éléments cités précédemment peuvent être en partie stockés sur le tunnelier et cela permet entre autres de les amener moins régulièrement et donc de garantir une certaine souplesse dans la logistique. Ainsi, par exemple, deux lots de sept voussoirs (ce qui correspond donc à deux anneaux complets) peuvent être stockés sur le tunnelier. Les fûts d'huile, de graisse ainsi que les conduites, supports ou caillebotis qui n'ont pas encore été installés sont également disposés à l'arrière du tunnelier en vue d'une utilisation rapide.

3.1.2 Approvisionnement en consommables

La fréquence d'acheminement vers l'arrière du tunnelier diffère selon les éléments à transporter. Ainsi, si les voussoirs doivent être amenés à chaque phase de creusement, l'acheminement des conduites ou des câbles

dépend de leur longueur. La figure 16 illustre les différentes fréquences des besoins du tunnelier en matériel (câbles, conduites, éléments de pose, futs, outils de coupe et de construction).

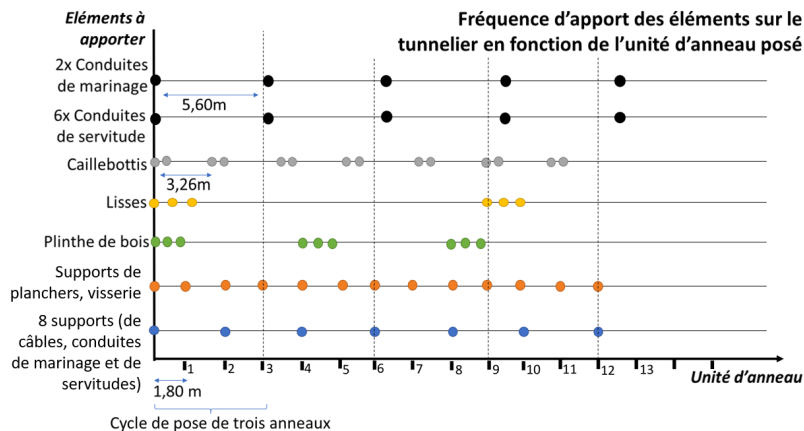


FIGURE 16 – Planification de l'arrivée des éléments à poser en fonction du nombre d'anneaux

À partir de la figure 16, nous parvenons à identifier les éléments à acheminer le plus fréquemment : **les voussoirs, les conduites et les supports**. L'approvisionnement des autres éléments comme les futs de graisse et d'huile, les rallongements de câbles ou de conduites d'aération n'est pas considéré ici car il est plus ponctuel et ne pose pas de problème de logistique majeurs.

Cet approvisionnement est réalisé par un TSP, un moyen de transport conçu pour l'acheminement des consommables vers le tunnelier et adapté à la structure particulière du tunnel. Il en existe de deux types (figure 17) : le TSP simple (ne pouvant transporter qu'un lot de 7 voussoirs pour un anneau) et le TSP double (pouvant transporter un lot de 7 voussoirs et un panier contenant du matériel selon les besoins). Chaque type de TSP peut aussi véhiculer du personnel si nécessaire.

En prenant pour base la longueur moyenne d'une conduite (5,6m) qui correspond à la longueur de trois anneaux environ ($3 \times 1,8 = 5,4\text{m}$), nous choisissons de construire notre schéma d'approvisionnement sur un cycle de trois séries de creusement et de pose de voussoirs (un cycle de trois anneaux). C'est sur la base de ce cycle (visible sur la figure 16) que nous établissons le schéma de logistique des TSP. Ainsi, à chaque phase de creusement, un TSP est envoyé vers le tunnelier :

- un TSP simple pendant les deux premières phases de creusement du cycle
- un TSP double transportant dans un panier les conduites, supports et caillebottis nécessaires à 3 anneaux pendant la troisième phase de creusement du cycle

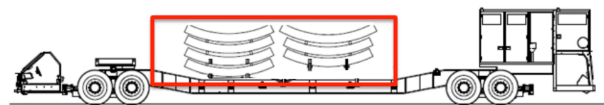
3.2 Mise en corrélation avec les phases de fonctionnement

En nous aidant des données de creusement du chantier de Hong Kong renseignées par Bouygues TP, nous avons créé un modèle de répartition du temps sur les différentes phases de fonctionnement (figure 18) : **creusement, pose des voussoirs, maintenance, rallongement des conduites, arrêts, changements de poste**.

Afin d'obtenir l'**avancement théorique maximal** du chantier en 24 h, un modèle est également réalisé en retirant les phases d'arrêt non planifiées et en considérant que tous les rallongements de conduites se font en temps masqué (cf. annexe [5]). Ce cas **idéal** correspond à la pose de 12 anneaux en 24 heures (contre seulement 8 anneaux en 24 heures dans la pratique).

Ainsi, les deux points principaux à optimiser sont :

- TSP simple : transporte uniquement des voussoirs



- TSP double : transporte voussoirs et panier d'éléments

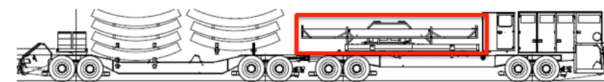


FIGURE 17 – Coupe longitudinale des trains sur pneus

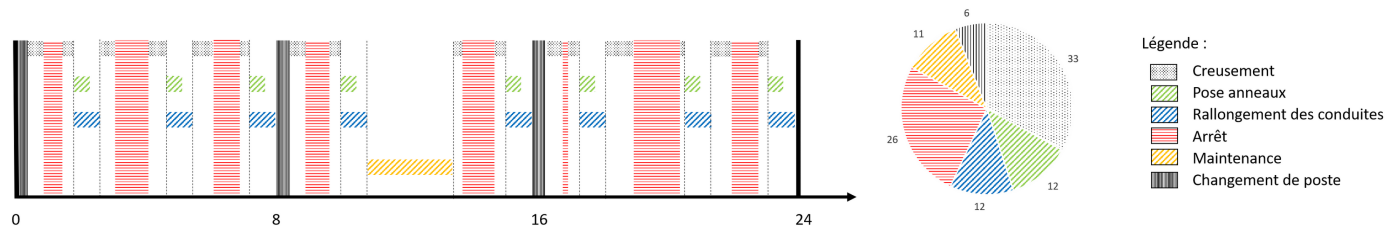


FIGURE 18 – Fonctionnement réel (basé sur chantier de creusement à Hong Kong)

- la logistique de gestion des TSP (ainsi que l'aménagement du tunnel pour gérer cette logistique).
- les étapes de pose des conduites en temps masqué.

L'étude de la logistique des TSP décrite ci-dessus nécessite de savoir s'il est utile de permettre le croisement de deux TSP dans le tunnel (entre le passage du TSP simple du TSP double) afin de gagner du temps dans l'acheminement des consommables et ainsi éviter des phases d'attente au niveau du tunnelier.

Afin d'évaluer la pertinence de cette solution, nous simulons le fonctionnement des TSP décrit précédemment à l'aide d'un algorithme JAVA, dont le script est disponible en **annexe [6]**, en considérant que les TSP ne se croisent jamais dans le tunnel. Cela nous permet, en fonction de la longueur de creusement, d'obtenir l'évolution du rapport du temps d'attente au niveau du tunnelier dû au retard des TSP sur le temps total des travaux (figure 19).

Ainsi, pour des longueurs de creusement inférieures à 3 km, les croisements ne sont pas nécessaires. En considérant que la longueur maximale de creusement pour le chantier T2A est d'environ 5 km, nous constatons que **6% du temps est perdu à cause de l'impossibilité de croisement**. Nous envisageons alors la possibilité de croisement de deux TSP.

Pour cela, il est nécessaire de faire couler une couche de radier (béton) dans le fond du tunnel. La hauteur minimale de radier au centre du tunnel nécessaire afin de permettre un croisement avec 1m de marge entre les deux TSP est de 70 cm.

Deux méthodes de pose de radier peuvent être envisagées :

- un système de pose attaché au tunnelier : dans ce cas la pose se fait en continu en même temps que l'avancement du tunnelier.
- une pose pendant l'arrêt du tunnelier au moment du passage dans les gares.

Pour le chantier du T2A, c'est la deuxième option qui a été retenue. Cependant, il convient de vérifier si le planning de creusement est en accord avec cette solution ainsi que d'en souligner les limites. Cette vérification est présentée en **annexe [8]**.

À un rythme de pose de 70m de radier par jour, il n'est pas toujours possible d'en poser sur l'intégralité de la distance entre deux gares du chantier T2A pendant que le tunnelier traverse une gare. Pour montrer cela, nous avons sélectionné des points de pose de radier, au niveau desquels le croisement de deux TSP serait possible. Nous pouvons alors schématiser les zones qu'il est possible de remplir de radier avec la méthode sélectionnée (figure 20). Les longueurs de tunnel où le croisement des TSP est impossible restent ainsi inférieures à 3 km, ce qui évite toute attente du tunnelier, d'après la figure 19.

3.2.1 Optimisation de la phase de pose des conduites

Nous l'avons vu sur la figure 18, la pose des conduites est réalisée en partie pendant la pose des voussoirs (temps masqué) mais provoque aussi des phases d'arrêts du tunnelier. Il est alors intéressant d'optimiser les méthodes de pose des conduites afin de réduire la durée de ces phases d'arrêt. Le panier est dimensionné afin de permettre d'acheminer l'ensemble des conduites, supports et caillebotis nécessaires sur une longueur de trois anneaux (un cycle décrit précédemment). Son dimensionnement est disponible en annexe [10].

De plus, nous proposons (figure 21) un planning de pose des conduites sur la longueur d'un cycle per-

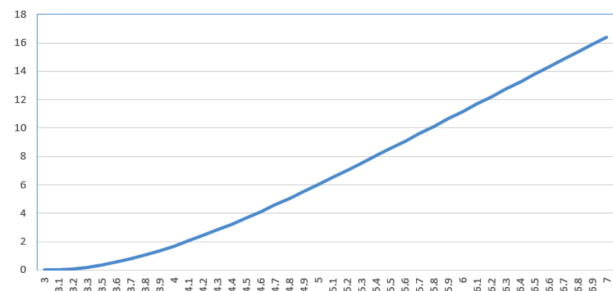


FIGURE 19 – Pourcentage de temps d'attente du TSP en fonction de la longueur du tunnel (en km)

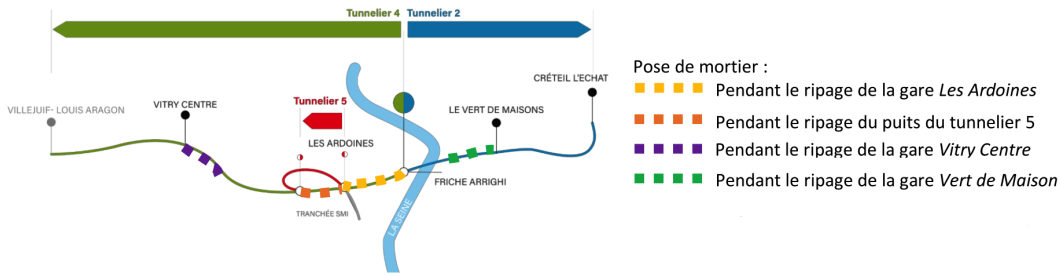


FIGURE 20 – Prévisions de pose du radier

mettant de réduire le temps d’attente en posant les conduites pendant chaque phase de pose des voussoirs du cycle. On peut espérer réduire les 12% de temps perdu à cause du rallongement des conduites, mis en évidence figure 18, grâce à ce planning.

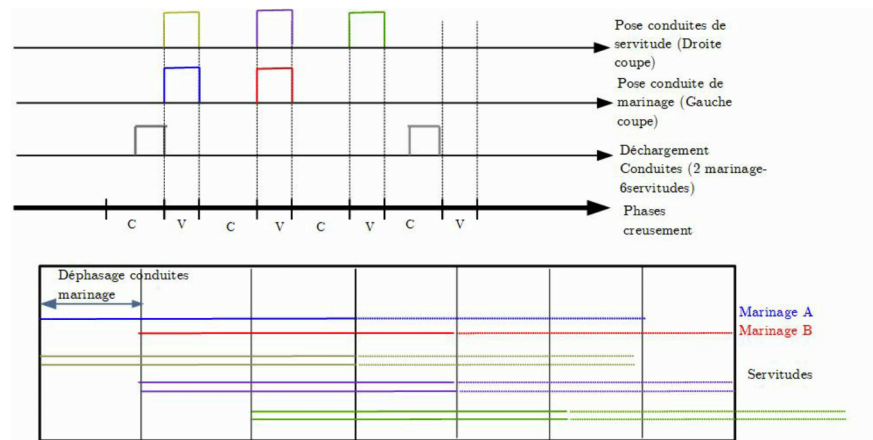


FIGURE 21 – Pose des conduites par rapport à un cycle de 3 anneaux

Ainsi, une logistique adaptée aux besoins du tunnelier peut permettre d’augmenter le pourcentage de temps de creusement. Elle agit principalement sur la gestion des TSP et sur leur possible croisement au sein du tunnel et sur la phase de rallongement des conduites à l’arrière du tunnelier. Cela permet de réaliser un maximum d’actions en temps masqué.

3.3 Utilisation des données pour optimiser la pose d’anneaux

Nous allons maintenant détailler un cas particulier d’optimisation du temps de chantier : celui de la pose des anneaux. Un outil de plus en plus utilisé pour l’optimisation est l’analyse des données, qui peuvent conduire à identifier des dysfonctionnements logistiques ou techniques.

Tout d’abord, décrivons plus précisément la pose d’un anneau. Cela nous permettra par la suite de mieux comprendre ce qui se passe pour analyser avec justesse les données auxquelles nous avons eu accès.

Un **anneau** est constitué de **sept voussoirs**, de 40cm d’épaisseur. Chacun des sept voussoirs a une forme différente. Le schéma ci-dessous (figure 22) représente l’enchaînement des 7 voussoirs dans un plan où l’anneau serait « déroulé ». Les proportions sont évidemment exagérées. Le voussoir trapézoïdal central est appelé clé et les 2 voussoirs de part et d’autre de la clé sont les contre-clés

Grâce à ces formes différentes, on peut construire un anneau universel dont les deux faces présentent un décalage angulaire de quelques degrés.

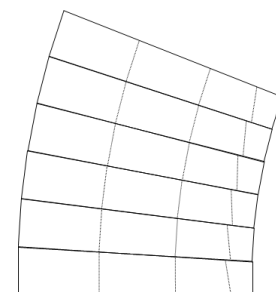


FIGURE 22 – virage de tunnel

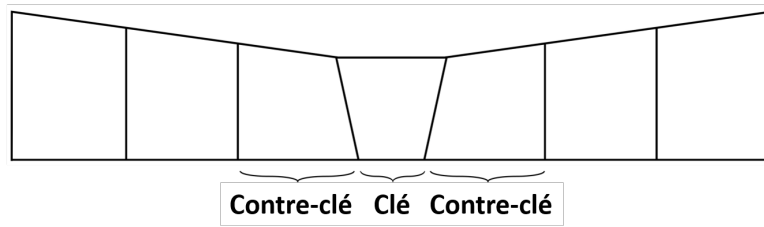


FIGURE 23 – Composition d'un anneau

Le schéma ci-contre (figure 23) illustre, toujours avec des proportions exagérées, 6 anneaux successifs, vus de dessus, pour lesquelles la clé a été posée tout à droite.

Cela met en évidence le fait que la position des clés au fur et à mesure des anneaux détermine la trajectoire du tunnel. Ainsi, une fois la direction du tunnel choisie par la maîtrise d'ouvrage, un algorithme calcule la position de clé de chaque anneau dans le tunnel. Les 14 positions de la clé possibles sont représentées par la figure 24.

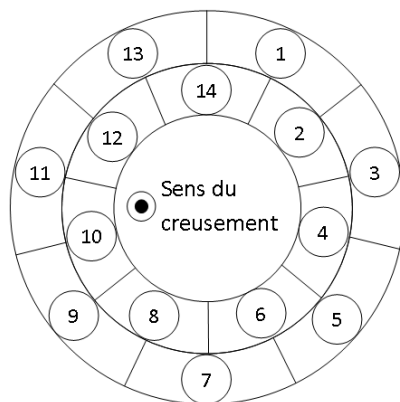


FIGURE 24 – Indices des positions de clés

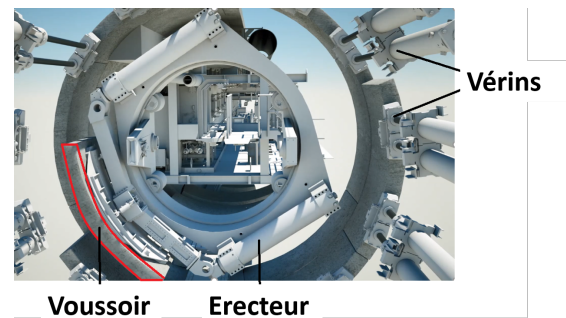


FIGURE 25 – Pose des voussoirs

Revenons plus en détail sur la pose des voussoirs, décrite en partie 1.2 : après avoir creusé 1m80 (largeur de l'anneau), deux des 14 paires de **vérins** du tunnelier se rétractent du voussoir sur lequel elles étaient appuyées. Dans le même temps, l'**érecteur** soulève un premier voussoir et effectue une rotation afin de le positionner à son emplacement sur le futur anneau. Les vérins rétractés se replaquent ensuite sur le voussoir posé. L'opération se répète encore 6 fois pour poser chacun des voussoirs. On commence toujours par les voussoirs les plus éloignés de la clé, puis on pose alternativement un voussoir de part et d'autre de l'anneau, de sorte que l'on finit par poser les 2 contre clés, puis la clé, qui vient fixer l'anneau. La figure 25 illustre ce processus. Nous pouvons maintenant analyser les données relatives à la pose d'un voussoir, qui sont issues d'un chantier de la ligne 14 datant de l'été 2017. Nous avons eu accès à **90 anneaux**, du 10ème au 100ème anneau posé à partir du départ du tunnelier. Cependant, le 34ème anneau ne présente aucune donnée, à cause d'une défaillance du système d'acquisition.

Le **tableau des données** mises à disposition par **Bouygues Tunnel Lab** est consigné en **annexe [15]**. L'utilisation du logiciel **Grafana** a permis d'observer l'évolution des données issues du tunnelier.

3.3.1 Caractérisation du cycle de pose d'un anneau

En suivant la description de la pose d'anneau faite plus tôt, nous avons établi un diagramme, qui décompose le processus en plusieurs séquences, qui sont représentées sur la figure 26 (à gauche). nous avons ensuite essayé de définir le cycle avec des critères pertinents d'un **point de vue numérique**, pour pouvoir appliquer un algorithme capable de repérer les cycles de pose d'anneau au milieu du reste des données. Nous nous sommes donc appuyés notamment sur la **pression dans l'érecteur et son écart à sa position initiale**. Cette définition algorithmique est résumée par le diagramme d'activité donné en figure 26 (à droite)

Cependant, dans le cas où un voussoir se fissure, l'érecteur doit aller en chercher un autre, ce qui fait au total 8 cycles de pose de voussoir. La précédente définition ne fonctionne alors plus. Pour corriger ce pro-

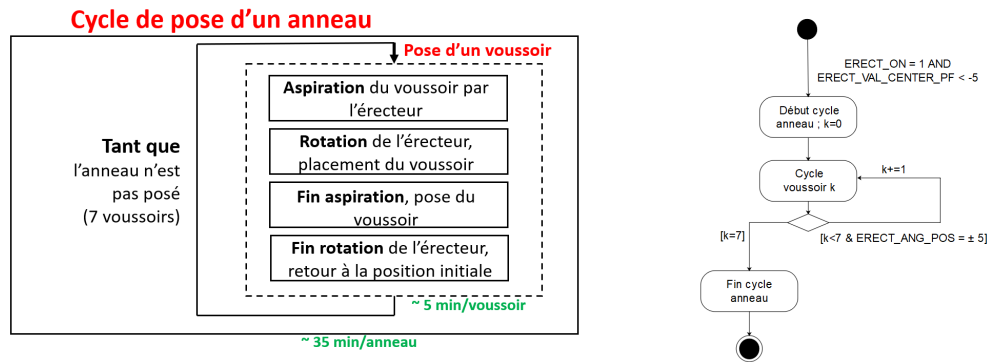


FIGURE 26 – Cycle de pose d’anneau (gauche), définition algorithmique (droite)

blème, nous avons implémenté une fonction comptant, pour chaque anneau, le nombre de cycle rétractation-replaquage effectué par la totalité des vérins, ce qui permet de surmonter ce problème.

3.3.2 Classification des cycles de pose d’anneaux

Cette méthode systématique permet donc d’étudier les données du tunnelier sur la période de pose de chaque anneau. A l’aide du langage de programmation **python**, nous avons déterminé le **temps de pose** de chaque anneau (figure 27). La distribution de ces temps, ci-contre, montre qu’une grande majorité est contenue entre 30 et 60 minutes. Le temps moyen est de **46 minutes**, nettement supérieur au temps au contrat de 21 minutes, et au temps considéré comme satisfaisant qui est de 35 min. Cela peut être dû au fait que nous sommes au début du creusement.

Dans un deuxième temps, nous avons classé les cycles de pose d’anneau en plusieurs **familles** en considérant à la fois des critères quantitatifs et qualitatifs. Ces familles sont décrites ci-dessous (figure 28).

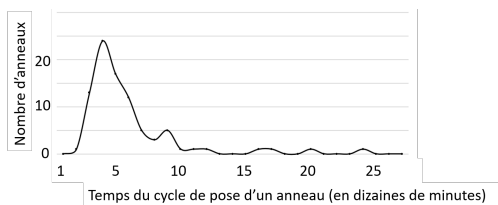


FIGURE 27 – Répartition des temps de pose d’anneaux

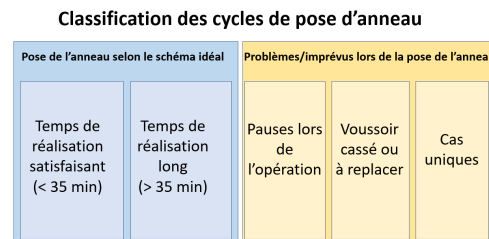


FIGURE 28 – Classification des cycles de pose d’anneau

Les « cas uniques » correspondent à des singularités que nous n’avons pas réussi à interpréter.

En **annexe [16 à 20]**, nous avons mis une illustration correspondant à chaque famille.

3.3.3 Traitement des données

Une fois les données ordonnées, nous avons pu les manipuler pour voir quels paramètres pouvaient allonger le temps de pose. Nous avons en particulier étudié 3 paramètres :

- Rappelons-le, **la position de la clé** détermine l’ordre dans lequel chacun des voussoirs est posé. Le diagramme ci-dessous (figure 29) montre que certaines positions, dans le **quart supérieur gauche** de l’anneau, semblent poser plus de difficultés aux opérateurs.

Voici une des **hypothèses** que nous avons formulées : il y a un plus grand nombre de clés dans le quart inférieur droit de l’anneau, (la trajectoire du tunnel tend à descendre et à tourner vers la droite).

Comme ce n’est que le début du creusement, les opérateurs se sont donc plus familiarisés avec cette position qu’avec les autres, ce qui expliquerait la différence de durée.

- La figure 30 montre que le temps de pose de la clé est plus grand que celui des autres voussoirs. Cela s'explique par le fait que la mise en position de la clé demande une grande précision (il faut l'insérer dans l'espace libre entre les contre-clés). De plus, on sait que le mauvais placement de la clé peut entraîner des fissures dans l'anneau et nécessiter un remplacement de celle-ci, occasionnant une perte de temps pour le chantier.

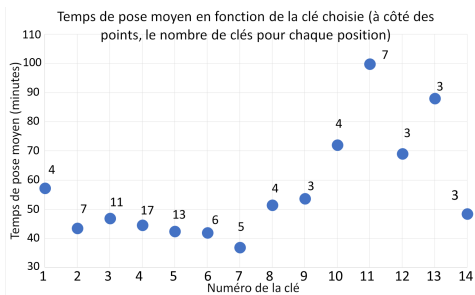


FIGURE 29 – Temps de pose moyen en fonction de la clé choisie

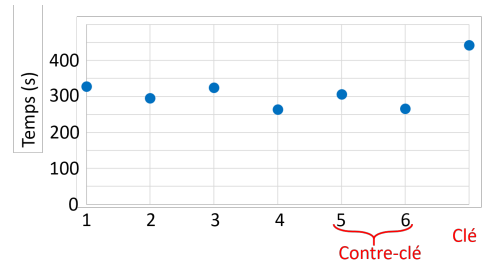


FIGURE 30 – Temps de pose moyen par numéro de voussoir

- L'étude du **temps d'attente entre chaque pose de voussoir** (figure 31) montre que celui-ci est en moyenne légèrement supérieur à la minute. En particulier, il est plus élevé entre les deux premiers voussoirs.

Nous avons pensé qu'il pouvait être possible d'amener le voussoir plus vite à l'érecteur et de réduire cette pause. Ce temps économisé entre chaque voussoir, multiplié par le nombre de voussoir dans un tunnel représente un gain de temps non négligeable pour le chantier. Cependant, sans connaissance plus profonde du processus d'approche des voussoirs, ni de données qui le caractérisent, il nous est difficile de quantifier ce gain de temps.

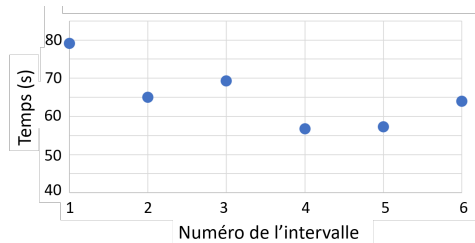


FIGURE 31 – Temps de pause moyen entre deux voussoirs

3.4 Bilan

La démarche adoptée consistait à **caractériser le fonctionnement** en utilisant des critères sur les données disponibles, puis à **classer les cycles** en plusieurs catégories, pour ensuite **analyser les facteurs** qui dégradent le temps de cycle. Le cas qui nous intéressait ici était la pose des voussoirs, et les **données** étaient relativement **limitées**. Il est donc difficile de proposer des pistes d'optimisation, d'autant que l'analyse de données ne peut pas se passer d'une observation de la **réalité du terrain**, qui aurait permis de mieux savoir ce qui se passait réellement lorsque l'on identifiait un problème. De plus, les 100 premiers anneaux d'un tunnel se situent encore sur de la **courbe d'apprentissage**, qui n'est pas forcément représentative de la suite du chantier en terme de performances. Cependant, la démarche que nous avons adoptée montre que l'analyse des quantités importantes de données qui proviennent du tunnelier permet de mettre en évidence différents phénomènes, que l'on peut envisager de mieux **anticiper** sur la suite d'un chantier ou dans des chantiers futurs, pour améliorer les performances.

Deuxième partie

Impacts et Risques

4 Risques : départ et arrivée du tunnelier dans une gare

4.1 Présentation des risques

4.1.1 Rôle du mortier

Comme nous l'avons indiqué lors de la présentation générale des tunneliers, la progression dans le sol se fait en **deux temps** : **excavation** du sol et **avancement** puis **pose des voussoirs**. Les anneaux étant posés à l'intérieur de la jupe, la roue de coupe creuse un cylindre de diamètre plus grand que celui de l'extrados des anneaux. Il reste donc **un vide entre les voussoirs posés et le sol** qui in fine serait rempli par le terrain environnant s'il était laissé vide. Il existe alors un **risque de tassement en surface**, de **dislocation des voussoirs**, de perte d'étanchéité du tunnel. Pour éviter cela, on injecte un mortier classique ou un **"bi-composant"** dans cet espace lorsque le tunnelier avance (figure 32). Il permet de remplir l'espace annulaire, reprendre les **efforts** du terrain et d'assurer l'**étanchéité** à long terme du tunnel (figure 33).

Sur la Figure 32, le tunnelier pose les voussoirs. Le bi-composant déjà injecté est visible en orange.

Caractéristiques du bi-composant : le bi-composant est un mélange d'un composant A « mortier+retardateur de prise » et d'un composant B « accélérateur de prise » ce qui permet :

- de faciliter le pompage des deux composants jusqu'à l'injection.
- d'avoir un temps de **gélification** de quelques secondes (et un temps de **solidification** rapide) une fois les deux composants mis en contact.
- d'avoir une **viscosité** qui augmente lorsque le bi-composant est immobilisé (thixotropie).
- d'obtenir un composé à **faible perméabilité**.

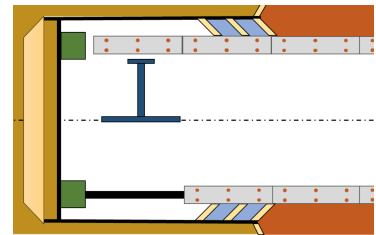


FIGURE 32 – Schéma simplifié de l'avant du tunnelier

4.1.2 Risque en entrée/sortie d'une gare

Le rôle de ce bi-composant est d'autant plus important à l'**entrée** ou **sortie** d'une gare ou d'un puits de lancement . Dans ces circonstances particulières, il y a un risque d'entrée d'eau dans la gare, cette eau pouvant entraîner du sol, ce qui se traduit par un affaissement de surface à l'aplomb du tunnel, voire l'effondrement des parois moulées (figure 34). En effet, si l'étanchéité n'est pas assurée à l'entrée ou à la sortie du tunnel, l'air à l'intérieur du puits étant à la pression atmosphérique et les sols derrière la paroi moulée à une pression $P(z) > P_{atm}$, cela entraîne une dépression qui va **drainer l'eau dans la cavité**. Ce phénomène a deux conséquences :

- Premièrement, l'eau entraîne et **dégrade le bi-composant déjà en place**, ce qui accélère la fuite. On peut même assister à un entraînement du sol dans la cavité.
- Deuxièmement, le sol étant drainé, il ne subit plus la poussée d'Archimède due à l'eau et sa densité apparente augmente. Il se compacte alors, créant des **tassements en surface**.

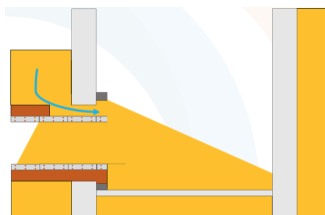


FIGURE 34 – Risque de tassement à l'entrée/sortie d'une gare

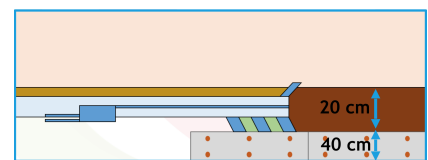


FIGURE 33 – Injection de mortier entre les voussoirs et le terrain

À titre d'exemple, sur le chantier de la future station porte de Clichy de la ligne 14, un défaut d'étanchéité dans les parois moulées a provoqué en juin 2016 une inondation du site. En plus des dégâts causés dans la gare, cet accident a fortement déstabilisé les sols à proximité mettant en lumière l'importance d'assurer l'étanchéité des gares et en particulier des raccordements entre les tunnels et les gares, et donc la qualité du mortier injecté dans le vide annulaire.

Les entreprises cherchent donc aujourd'hui des moyens de détecter une anomalie dans le mortier, sachant qu'il se trouve derrière les voussoirs, donc qu'il est *a priori* invisible et inaccessible.

4.2 Détection d'un vide dans le mortier

4.2.1 Choix de la méthode de détection des vides

Il existe différentes méthodes géophysiques (électromagnétiques, gravimétriques, ...) pour détecter des vides dans un cadre général. Une comparaison entre ces méthodes a été développée. Elle est présente en **annexe [1]**.

Les méthodes acoustiques et électromagnétiques semblent être les plus adaptées à la problématique. Aujourd'hui, on évalue principalement la qualité du mortier d'injection par carottage, mais les méthodes non destructives apparaissent sur certains chantiers, en particulier la détection par géoradar ou par impulsions ultrasoniques (voir référence en **annexe[1]**). Nous avons choisi d'approfondir la méthode sismique.

4.2.2 Méthode sismique : principe de simulation

Afin d'élaborer une méthode sismique de détection des anomalies dans le mortier injecté, nous disposons d'un programme informatique permettant de simuler l'émission d'ondes sismiques S (ondes de cisaillement) et P (ondes de compression) en 2D dans le sol et l'enregistrement de l'intensité de déformation horizontale et verticale (sous forme d'une échelle de tons) en fonction du temps et de la distance du récepteur à la source.

Il est ainsi possible de définir :

- la configuration du sol dans la zone explorée en indiquant la masse volumique et les vitesses respectives des ondes S et P.
- la position de l'émetteur d'ondes.
- la position des différents récepteurs.

Nous choisissons de modéliser le sol examiné en distinguant :

- la zone occupée par les voussoirs (anneaux de béton).
- l'espace dans lequel a été injecté le bi-composant.
- le terrain excavé par le passage du tunnelier.

Nous disposons l'émetteur ainsi que les récepteurs à la surface du voussoir. Les récepteurs sont espacés de manière régulière le long du tunnel.

Il est alors possible, après simulation, d'analyser les résultats des enregistrements sous forme graphique. Les composantes longitudinale et transversale de la déformation sont représentées en fonction de la distance du capteur à l'axe (en abscisse) et du temps (en ordonnée). Le principe de lecture des enregistrements et d'identification des ondes lors des simulations est présenté en **annexe [2]**.

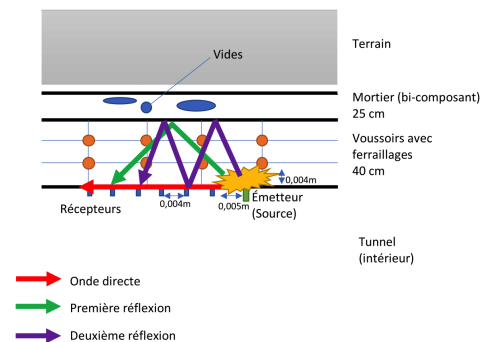


FIGURE 35 – Expérience théorique de la méthode sismique

4.3 Modélisation et analyse des résultats

4.3.1 Détection théorique du vide

Pour réussir à identifier la présence de vide dans le mortier, nous comparons les simulations obtenues en l'absence de vide (simulation témoin) avec les simulations identiques dans lesquelles nous matérialisons la présence d'un vide par de l'eau. Dans chacune des configurations examinées ci-après, nous soustrayons les images obtenues dans les cas avec et sans présence de vide. Si cette soustraction nous permet d'apercevoir un signal, celui-ci est alors dû à la présence de vide.

4.3.2 Simulation d'un cas simple

Dans la première simulation (figure 36), les voussoirs, le mortier ainsi que le terrain excavé sont des milieux homogènes.

Nous remarquons que la soustraction des deux enregistrements nous permet de visualiser la différence induite par la présence de vide dans le mortier. Les ondes directes S et P ne sont pas visibles : en effet, la

présence de vide n’influence pas leur propagation. C’est donc l’évolution des ondes réfléchies qui permettent de détecter le changement des propriétés du milieu. L’annexe [3] propose un détail des conditions de simulation et l’affichage de la propagation des ondes.

4.3.3 Simulation d’un cas plus réaliste

Dans cette deuxième simulation, nous modifions les caractéristiques des voussoirs en y modélisant la présence de ferrailage, ce qui constitue un modèle plus réaliste. L’ensemble des résultats graphiques est présenté en annexe [4].

Ainsi, les simulations obtenues montrent que la présence de ferrailage modifie les enregistrements obtenus. En effet, ceux-ci peuvent causer un phénomène de diffraction. La différence des enregistrements est alors affectée des phénomènes liés à l’influence des ferrillages faisant apparaître des droites obliques qui n’étaient pas visibles auparavant.

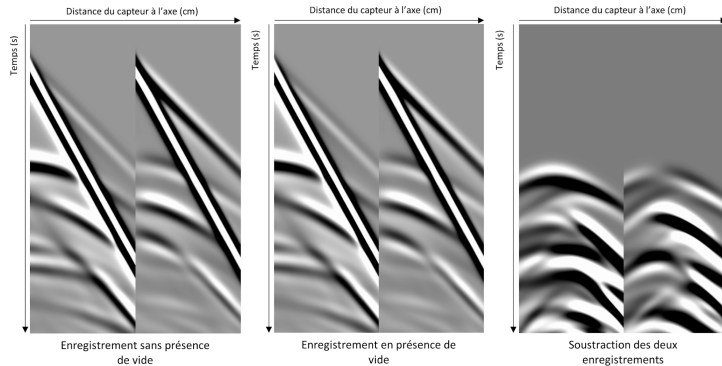


FIGURE 36 – Enregistrements des capteurs (cas simple)

4.3.4 Application du modèle théorique au cas réel

En supposant que le tunnel est invariant par translation, les conditions de notre simulation peuvent être reproduites dans le tunnel.

Néanmoins, cela impose de disposer d’une zone A témoin où le mortier ne présente pas de vide, à laquelle on peut comparer les zones B à tester, ainsi que de connaître la position des émetteurs précisément par rapport au ferrailage des voussoirs (figure 37). L’impact du positionnement par rapport au ferrailage n’a pas été étudiée ici.

Même dans le cas où ces hypothèses seraient satisfaites, il reste une erreur liée à la position de l’émetteur B par rapport à l’émetteur A (figure 34). Nous avons donc réalisé une simulation en décalant l’émetteur B de 10cm par rapport à la configuration de l’émetteur A. On obtient la figure 35. La même expérience avec un décalage de 3cm est disponible en annexe [5].

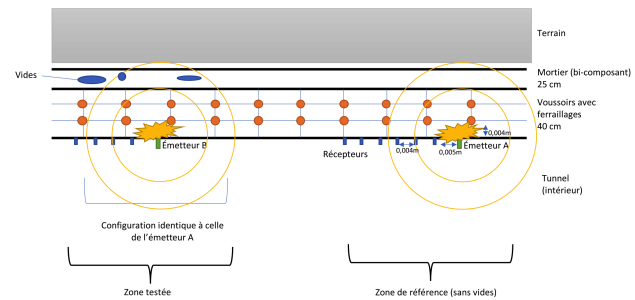


FIGURE 37 – Expérience réelle de la méthode sismique

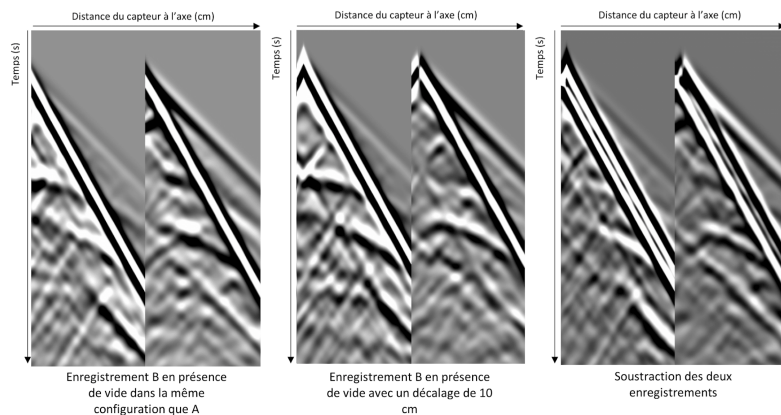


FIGURE 38 – Enregistrements des capteurs avec un décalage de 10 cm

On remarque que ces 10cm de décalage se traduisent par une translation des ondes directes. Loin d’être un problème, cela permet au contraire de corriger le placement de l’émetteur B : on le déplace jusqu’à annuler les ondes directes sur la figure de soustraction des enregistrements. On a alors deux configurations identiques pour A et B. Cela permet même de réduire les différences dues au couplage des dispositifs A et B (appareils, intensité de la source, réglages des récepteurs).

4.3.5 Limites de l'approche

Bien que les résultats obtenus semblent permettre de détecter théoriquement la présence de vide dans le mortier injecté (sans pour autant pouvoir le caractériser : taille, forme, remplissage), il est nécessaire de considérer les limites d'une telle approche ainsi que ses possibles voies d'amélioration.

En effet, nous avons effectué une modélisation très simplifiée du terrain (forme des structures, répartition du vide, homogénéité des milieux, contact parfait entre les différentes structures).

De plus, le modèle d'émission d'onde et d'enregistrement des signaux présente des hypothèses simplificatrices :

- on a considéré un modèle 2D d'émission d'onde (ceci est d'autant plus important qu'on cherche à caractériser le mortier à l'intersection tunnel/gare).
- on a considéré un creusement régulier : dans la réalité, il est en effet possible que le tunnelier excave les terrains de manière irrégulière.
- on a également supposé que le tunnel est géométriquement invariant par translation (absence de courbures du tunnel).
- on a fait l'hypothèse qu'il était possible de pouvoir identifier de manière exacte une zone témoin.

Enfin, les perturbations liées aux conditions de creusement sont également à prendre en compte. On a effectivement observé la sensibilité des signaux enregistrés. Ainsi, quelques écarts au modèle théorique (qui sont inévitables dans un cas d'application réel) peuvent générer un signal perturbé. Par exemple, la présence de bruit peut nuire à la lecture du signal (vibrations dues au creusement, à la circulation dans le tunnel, à l'activité en surface).

4.4 Autres approches

L'utilisation des simulations sismiques peut également donner lieu à d'autres types d'approches expérimentales de détection du vide :

- sur le même schéma que l'expérience décrite précédemment, nous pouvons construire une approche numérique 3D sur la base de la connaissance parfaite du tunnel (données de creusement) et de son environnement en supposant que le mortier a été injecté de façon idéale. Ceci constituerait le modèle témoin. Les simulations seraient alors effectuées sur le terrain de la même manière.
- il est aussi possible de réaliser une émission continue d'ondes le long du tunnel grâce à une source en déplacement et d'enregistrer les signaux de manière régulière. En supposant que le cas de la présence de vide est un cas particulier, sa détection se fait alors en observant une anomalie par rapport à l'ensemble du signal enregistré.

4.5 Bilan

La détection d'anomalies dans le mortier injecté demeure à l'heure actuelle un sujet de recherche pour lequel aucune approche industrielle n'a encore été proposée. La méthode majoritairement utilisée reste le carottage au travers du voussoir même si cela endommage les installations déjà mises en place et ne donne qu'une information ponctuelle sur le diamètre de la carotte. La méthode sismique étudiée ici constitue ainsi une première approche d'un procédé non destructif de détection. Cependant, son application dans un contexte réel de chantier nécessite encore des améliorations importantes.

5 Les chantiers du Grand Paris Express et l'environnement

La réalisation d'un chantier de l'ampleur du Grand Paris Express améliorera, à terme, les déplacements des populations habitant à proximité des gares. Cependant, la période de travaux amène avec elle de nombreuses nuisances sur l'environnement proche de l'emprise des chantiers. Il s'agit donc, non seulement préserver la tranquillité des territoires accueillant les chantiers du Grand Paris Express, mais également de limiter l'empreinte environnementale des travaux. En effet, sur le lot T2A que nous étudions, de nombreux chantiers se déroulent dans un milieu extrêmement urbanisé alliant axes de communication saturés, zones commerciales, habitations, écoles et parcs. Ceci impose que les groupements mandataires respectent de nombreuses règles sur les méthodes employées (bruit, lumière, trafic, propreté), règles qui sont pour l'essentiel intégrées au contrat signé avec la Société du Grand Paris.

Après avoir étudié les réglementations encadrant un chantier du Grand Paris, nous caractériserons ses impacts sur les populations locales, nous réaliserons un diagnostic environnemental local d'un des chantiers du lot T2A (en particulier celui visité de la friche Arrighi) en énumérant les solutions mises en place et donnant des pistes d'amélioration éventuelles.

5.1 Encadrement légal et réglementations

Les chantiers du Grand Paris sont encadrés par de nombreuses règles environnementales : des lois, des contraintes contractuelles dues au voisinage ou des standards d'entreprises. Légalement, toute installation apportant potentiellement des nuisances à l'environnement doit être recensée en tant qu'**ICPE** (Installation Classée pour la Protection de l'Environnement) afin d'être encadrée par des normes spécifiques. Pour cela les dépositaires du dossier doivent faire valider leur projet par les services de l'Etat, qui sont autorisés à réaliser des contrôles sur le site (DRIEE, police de l'eau). Trois régimes d'ICPE existent en fonction de la dangerosité : Déclaration, Enregistrement, Autorisation. A cela s'ajoutent diverses réglementations européennes comme la **Directive Reach** sur l'utilisation de produits chimiques.

En pratique, sont notamment imposés :

- des seuils chiffrés à ne pas franchir (pour le volume sonore : 70dB le jour et 60dB la nuit, voire pour une zone à émergence réglementée +5dB jour/+3dB de nuit entre état initial, avant chantier, et installation ; pour les éléments chimiques présents dans les rejets, pH de l'eau < 8,5 pour le rejet dans le réseau d'eaux usées...)
- des équipements adaptés à la gestion des déchets
- des règles de respect de la faune et de la flore (arbres, espèces rares...)
- des horaires de travail

A cela s'ajoutent des exigences imposées par le maître d'ouvrage (Société du Grand Paris : SGP), notamment en matière écologique (dans le cadre du chantier T2A, l'évacuation des terres par barge est un exemple de ce type d'exigence). Ainsi les impacts environnementaux sont étudiés selon le processus suivant :

1. Prise en compte de l'état initial avant chantier
2. Evaluation des impacts potentiels
3. Mesures d'inspection

Dans tous les cas, des mesures sont prises selon la méthode ERC (Eviter, Réduire, Compenser) :

- on évite les nuisances si possible
- si l'on ne peut pas éviter, on réduit
- si l'on ne peut pas réduire, on compense

Cependant, des normes trop contraignantes sont parfois impossible à respecter. Des concessions sont alors faites au vu des circonstances : par exemple, le bassin parisien étant naturellement sulfaté, les rejets dépassent les seuils de sulfate fixés, mais cela est toléré grâce à un accord passé avec le concessionnaire du réseau.

5.2 Diagnostic environnemental

5.2.1 Impacts sociaux

Malgré les bénéfices du métro, insérer un chantier dans un espace urbanisé, provoque souvent des tensions entre riverains et groupements de construction (et la SGP). Nous avons donc déterminé les nuisances d'un chantier, puis analysé comment deux chantiers s'inséraient dans un milieu urbain.

5.2.1.1 Diagnostic

Après notre visite sur le site de la Friche Arrighi, voici un récapitulatif de l'origine des nuisances qui peuvent affecter l'environnement voisin d'un chantier du Grand Paris, des exemples de solutions mises en place par le groupement Horizon et la SGP et des suggestions d'amélioration.

Nuisance	Circulation et bouchons	Lumière	Bruit	Propreté	Vibrations et tassements
Cause	Transport matériel entre le chantier et les usines ou du personnel du chantier.	Projecteurs lumineux très puissants pour le travail de nuit, nécessaires pour la sécurité des employés.	Outils, camions, station de traitement des boues. Non respect des horaires.	Poussière, terre sur la chaussée, déversements de boue à cause des camions lors du transport de déblais.	Vibrations et éventuellement tassements pouvant provoquer des fissures dans les bâtiments.
Solution	Evacuation des déblais par voie fluviale et co-voiturage pour les employés.	Orientation des projecteurs en les focalisant sur la zone de travail, mise en place des vitres givrées.	Palissades, capots pour engins, plan de circulation évitant les marches arrières des camions et les bruits associés.	Convoyeurs et camions bâchés, boue arrosée, décroqueur et lave roue pour les camions	Tunnelier à densité variable limite les vibrations, monitoring lors de la pose du mortier.
Amélioration	Transport des voussoirs par voie fluviale ou ferrovière, l'usine à voussoir étant en bord de Seine.	Recouvrir entièrement le chantier. Problème : trop cher pour la durée des travaux en surface.	Meilleur respect des horaires.	Lave roue pour les véhicules légers	Prévention auprès des riverains.

Dans tous les domaines, la **communication** permet d'améliorer l'entente entre les riverains et les mandataires des chantiers. En effet, faire comprendre un chantier et ses enjeux est souvent un bon moyen de le faire accepter par les citoyens dérangés. Actuellement, on constate une réelle volonté de la part de la Société du Grand Paris de communiquer (palissades explicatives). Toutefois les groupements réalisant les chantiers n'ont pas la possibilité de communiquer avec les riverains, ces informations devant passer par la Société de Grand Paris, ce qui crée parfois des incompréhensions lorsque l'information n'est pas transmise correctement.

5.2.1.2 Exemple comparatif

Nous avons mis en exergue certains de ces impacts par en les relevant sur deux chantiers visités dont l'emprise est de nature différente. Nous avons caractérisé l'environnement de ces deux sites (figures 39 et 41) pour mieux appréhender les différences dans les relations avec les populations (figures 40 et 42).

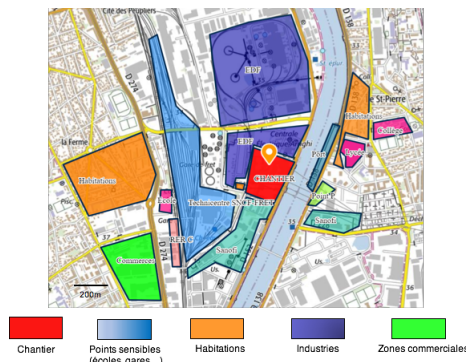


FIGURE 39 – Friche Arrighi 1 :4153

Site entouré d'autres sites industriels qui ne posent pas de problèmes; une seule habitation très proche, pas de grosses contraintes.



FIGURE 40 – Sortie chantier friche Arrighi
On constate l'absence de palissades anti-bruit et la présence de boue en sortie de chantier malgré les lave-roues.

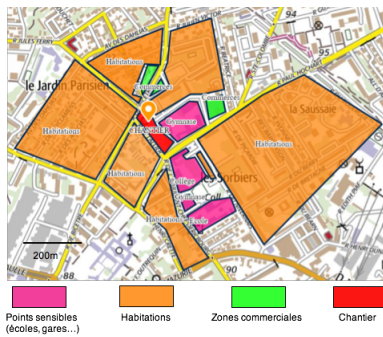


FIGURE 41 – Chevilley Trois Communes(extension sud Metro 14) 1 :21820

Site encerclé d’habitations et d’écoles. Les contraintes imposées au groupement sont donc plus fortes. Les riverains se plaignent notamment du bruit, de la lumière et de la saleté/boue sur la voirie.



FIGURE 42 – Chantier de Chevilley Trois Communes

On observe des travaux très bruyants dans un milieu résidentiel, ce qui a imposé l’installation de parallèles hautes (cf Annexe [1])

5.2.2 Impacts écologiques

A long terme, un projet de l’envergure du Grand Paris s’inscrit dans une perspective globale de développement durable. Il est donc naturel de se poser des questions quant à l’empreinte écologique des chantiers. Nous avons donc recensé et listé différents types d’impacts selon leur catégorie : pollution de l’eau, de l’air, des sols traitement des déchets, préservation de la faune et de la flore.

5.2.2.1 Pollution de l’eau

Les chantiers, notamment souterrains, utilisent de grandes quantités d’eau qu’il faut rejeter. Par exemple, sur le chantier de la gare Vert des Maisons sur la ligne 15 Sud, 5493 m³ ont été consommés entre Mai et Juin 2018 (cf relevé et analyse en **annexe [2]**). A cela on ajoute de nombreux produits chimiques qui affectent plus ou moins directement la qualité de l’eau, les eaux pompées des terrains lors des phases de creusement du tunnelier (eaux d’exhaure) souvent polluées, ainsi que les fuites diverses que l’on peut trouver sur les chantiers. On regroupe les différentes sources de pollution des eaux, les restrictions et les solutions mises en place dans le tableau ci-dessous.

Type de pollution	Pollution de l’eau		
Impact sur l’environnement	Perçage de nappes phréatiques	Rejets d’eaux polluées	
Sources de pollution	Forages en surface, injections de mortier	Rejets en Seine ou dans les réseaux	
Encadrement	Interdiction légale de connecter deux nappes pour les forages, mais pas pour les injections	Police de l’eau : pH<8,5, concentration maximale des matières en suspension : 51g/L sur réseau d’eaux usées, 30 g/L en Seine	
Solutions mises en places	Aucune	Eaux provenant du pompage dans les nappes : filtre à sable/charbon actif, décanteur	Eaux de lavage (chargées en ciment) : diminution du pH, décanteur
			Pompage dans la Seine, bassin de rétention eaux de pluie

Des innovations chez Bouygues (via son Tunnel Lab) sont envisagées, notamment des systèmes d’analyse en continu de la qualité de ces eaux d’exhaure.

5.2.2.2 Pollution locale de l'air

S'il est censé réduire la consommation de gaz à effets de serre, un chantier du Grand Paris émet, sur site, diverses pollutions aériennes. Outre les **émissions de CO₂** que nous étudierons en II)4), l'air est souvent chargé de **poussière**. Par temps sec, le passage des engins de chantier sur des voies en terre rend l'atmosphère irrespirable et le travail impossible. Parmi les solutions mises en place, il y a le bétonnage des cheminements véhicule ou dans le cas de voies en terre, l'arrosage réguliers de ces dernières. Toutefois cette solution augmente un peu plus la consommation en eau du chantier.

5.2.2.3 Pollution des sols



FIGURE 43 – Imbrication de cuves de stockage d'acide

L'utilisation de produits chimiques est fortement réglementée en France et en Europe (**Directive REACH**). Sur les chantiers, ces produits sont manipulés avec précaution et entreposés dans des lieux sécurisés, en séparant les différents produits et avec un bac de rétention pour éviter les fuites. Toutefois nous avons constaté l'absence d'alternatives écologiques à l'utilisation de produits chimiques dans les sols lors de la mise en place des parois moulées et d'injections pour solidifier les sols.

5.2.2.4 Déchets

Un chantier qui s'inscrit dans la démarche de développement durable imposées par la Société du Grand Paris est un chantier qui sait traiter ses déchets. Pour le groupement Horizon : des bacs de tri pour les produits de chantier (métaux, bois et, plastiques) et des systèmes de récupération des produits chimiques (par l'entreprise Chimirec) ont été installés. Il reste encore à développer le tri sélectif au sein des équipes présentes sur chantier. Pour cela, la sensibilisation des ouvriers, l'implémentation de poubelles de tri sur la base vie et sur le chantier pourraient améliorer tant la propreté que la revalorisation des déchets quotidiens.



FIGURE 44 – Affichage de sensibilisation au tri

5.2.2.5 Préservation de la faune et la flore



FIGURE 45 – Cache à lézards, Friche Arrighi

Même en milieu urbain, un chantier perturbe la faune et la flore présentes avant le démarrage du chantier. C'est la raison pour laquelle la Société du Grand Paris a inventorié, lors des travaux préparatoires, les espèces végétales et animales potentiellement mises en danger. Sur la friche Arrighi par exemple, une espèce de lézard locale a fait l'objet de la création d'abris. Ces mesures demeurent toutefois anecdotiques et sont chronophages pour l'avancée des travaux.

5.3 Bilan

Les enjeux socio-écologiques sont pris en compte par la Société du Grand Paris et les groupements mandataires. Toutefois, ces efforts demeurent focalisés sur les chantiers et leurs alentours. En termes d'écologie à une plus grande échelle, nous avons constaté que la balance entre intérêt environnemental et intérêt économique avait tendance à pencher vers une diminution des coûts. En effet, si sur la Friche Arrighi, le mode d'évacuation des déblais est imposé par barge, sur d'autres chantiers, ce dernier s'effectue par camions. Nous allons donc envisager, dans la partie suivante, un transport de déblais par voie ferroviaire afin d'étudier sa compétitivité.

6 Gestion des déblais

6.1 Les déblais du Grand Paris Express

Un chantier d'excavation souterrain crée une quantité importante de déblais dont il faut assumer la gestion, et si possible la valorisation. Avec les contraintes du Grand Paris en terme d'environnement ou d'économie, une logistique d'évacuation s'avère nécessaire. Nous avons donc étudié les enjeux de l'évacuation des déblais du métro du Grand Paris Express, et notamment la possibilité du transport ferroviaire de ces derniers avec leur accueil dans une carrière de Mayenne.

6.1.1 Estimation du volume de déblais

Selon la Société du Grand Paris, **45 millions de tonnes de déblais** devraient sortir des chantiers du Grand Paris Express à partir de 2016 et ce pendant environ 10 ans..

En effet, pour ce projet contenant 200km de voies et 68 gares, on peut, en supposant des galeries de diamètre 10m et des gares de 30m x 30m x 100m évaluer à **21,8 millions** le nombre approximatif de m^3 de déblais qui devront être évacués. Avec une masse volumique approximative de $2 t/m^3$ pour les roches ou boues extraites, on évalue donc les déblais à **43,6 millions de tonnes de déchets**, ce qui correspond à l'estimation de la Société du Grand Paris. Ce tonnage titanesque représenterait une **augmentation d'entre 10 et 20%** du volume total des déchets produits en Ile-de-France ces années, d'où la nécessité de penser l'évacuation des déchets en amont pour la Société du Grand Paris.

Le tronçon T2A de la ligne 15 Sud comporte à lui seul 7,7 kilomètres de voies et 4 gares d'où un volume approximatif d'un million de mètres cubes de déblais. En intégrant les ouvrages de maintenance, on peut évaluer à 2 millions de mètres cubes le volume de déblais de ce lot (cohérent avec la valeur de la Société du Grand Paris qui donne un tonnage de 13,5 millions de tonnes pour la seule ligne 15 Sud).

6.1.2 Qualité des déblais

Les déblais inertes du Grand Paris Express (40% du volume total) proviennent souvent de sols contenant naturellement une teneur élevée en certains éléments comme les sulfates ou de sols naturels qui ont été extraits lors du creusement de tunnels et auxquels des produits chimiques ont été ajoutés. Ces déblais ne sont donc pas dans la classe la moins restrictive (K3) et la législation actuelle en interdit le stockage dans des carrières. Des sols naturels sont donc extraits sans possibilité d'être placés dans des carrières.

La nécessité de leur stockage pourrait amener à la constitution d'une nouvelle classe de déblais, **la classe K3+**, spécifiquement pensée pour les produits issus du forage de tunnels (les teneurs maximales sont environ multipliées par 3 par rapport à la classe K3, tableau détaillé en **annexe [1]**). Les carrières pourraient donc relativement simplement engager le stockage de déchets K3+, qui nécessiteraient les mêmes installations que la classe K3 pour être traités.

Les 60% de déblais restants sont des déchets non-inertes, avec des teneurs élevées en métaux ou fluorures. Ce type de déchets est **classé K2** (déchets non inertes mais non dangereux) voire **classé K1** pour la partie polluée, et ne peut donc pas être légalement utilisé pour le remplissage de carrières classiques, non équipées pour ce type de déblais.

6.1.3 Possibilité d'évacuation des déblais du Grand Paris Express en Île-de-France

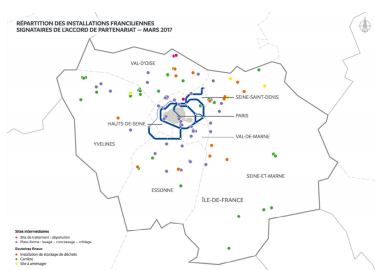


FIGURE 47 – Carrières franciliennes partenaires

Qualité environnementale prévisionnelle des déblais à l'échelle du GPE : répartition par type de déblais

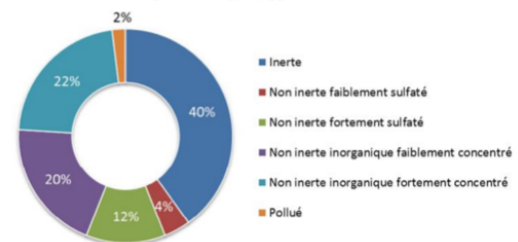


FIGURE 46 – Qualité environnementale des déblais prévue à l'échelle du GPE (SGP)

(les teneurs maximales sont environ multipliées par 3 par rapport à la classe K3, tableau détaillé en **annexe [1]**). Les carrières pourraient donc relativement simplement engager le stockage de déchets K3+, qui nécessiteraient les mêmes installations que la classe K3 pour être traités.

La Société du Grand Paris a déjà mis en place un réseau de partenaires pour l'évacuation des déblais produits par les chantiers actuels et à venir. Ces partenaires sont majoritairement présents en Ile-de-France afin de limiter les coûts de transport.

Afin d'évaluer la capacité des carrières franciliennes à accueillir ces déblais, nous avons cherché à estimer le volume total de vides de carrières développés par an.

En l'absence de données, nous avons évalué ce vide sur la base de la production annuelle de granulats en Ile de France, qui s'élève à 10 Mt. En supposant que l'espace libéré soit intégralement disponible au stockage des déblais du Grand Paris Express, les carrières franciliennes peuvent théoriquement accueillir la totalité des déblais générés par le Grand Paris Express sur 10 ans.

6.2 Étude de cas : la carrière de Voutré comme site d'accueil des déblais

La carrière de Voutré, en Mayenne, est un site d'accueil potentiel des déblais de certains chantiers du Grand Paris Express. Malgré son éloignement de la capitale, elle dispose d'un accès direct aux voies de chemin de fer. Elle n'est actuellement équipée que pour le chargement des wagons. Au centre de la carrière se trouve un lac qui doit être remblayé dans les 30 prochaines années d'après le contrat actuel. Le site dispose d'une autorisation lui permettant d'accueillir 350 000 tonnes de déblais par an et est en train de constituer un dossier pour obtenir l'autorisation d'accueillir des déchets de classe K3+.



FIGURE 48 – Vue aérienne et carte topographique de la carrière

L'étude de cartes topographiques fournies par la carrière permet de déterminer les emplacements où les déchets peuvent être placés ainsi que le volume de vide disponible pour leur stockage.

Les déblais seraient dans un premier temps accueillis dans la zone à l'est du lac (**zone bleue** sur la figure 48) qui pourrait en recevoir environ $450\,000\text{ m}^3$ (ce qui correspond à 900 000 tonnes). Le site de Voutré étant autorisé à accueillir 350 000 tonnes de déblais par an au maximum, le remplissage de cette zone devrait prendre un peu moins de trois ans. Le creusement du lot T2A devant produire 2 Mm^3 de déblais, les déblais supplémentaires pourraient ensuite être stockés au fond et dans l'espace au-dessus du lac, qui offre au moins 3 millions de mètres cubes d'espace disponible (**zone rouge** sur la figure 48).

Le stockage des déblais du creusement du T2A dans la carrière de Voutré est donc possible. Le lac est aujourd'hui utilisé pour déposer les découvertes (matériaux de surface altérés) extraites de la carrière mais son utilisation pour le dépôt de déblais est également envisageable. A terme, il doit de toute façon être remblayé.

6.2.1 Coût du transport

Nous avons pu estimer le coût du **transport par camion** jusqu'à Voutré à **15€** par tonne, et celui du **transport par train** à environ **17€** par tonne (à partir des informations données par la SNCF). L'utilisation de camions «opportuns» (camions vides qui passent à proximité) est également une solution envisageable mais elle est difficile à mettre en place de manière systématique. Ce résultat est inattendu. La recherche de l'optimum économique pour le groupement d'entreprises amènerait au choix le plus défavorable en terme d'émissions de CO₂. Ce résultat montre que la prise en compte des enjeux de développement durable nécessite des incitations politiques fortes.

Nos modèles de coûts de transport nous permettent aussi d'estimer que pour pouvoir être compétitif, le site de Voutré doit envisager de vendre l'espace pour accueillir une tonne de déblais **7€** moins cher que les carrières franciliennes (pour compenser le surcoût du transport).

En dépit de ces résultats, nous avons poursuivi la réflexion sur le transport par train. Il faut ajouter d'une part que la location de wagons sur le long terme permet de réduire un peu le coût à la tonne du transport par train, et d'autre part que les acteurs du secteur se posent de sérieuses questions sur la capacité de transport par camion en France, dans la mesure où elle semble souffrir d'un fort manque de main-d'œuvre (chauffeurs de poids lourds).

6.2.2 Transport et déchargement sur le site de Voutré

Pour le transport des déblais par train, nous avons retenu la solution des **wagons basculants**. C'est en effet la seule solution technologique qui nous paraisse adaptée à la nature des déblais (variable depuis une boue jusqu'à un solide).



FIGURE 49 – Wagon à déchargement latéral

Chaque wagon peut contenir 75 tonnes de déblais et mesure environ 12 mètres de long.

Nous avons imaginé une méthode de déchargement des wagons : le déchargement se ferait dans une **fosse** longue de 70 mètres (figure 50), large de 7 mètres et profonde de 4 mètres (pouvant donc accueillir le déchargement de 5 wagon à la fois) à paroi oblique au fond de laquelle se trouverait un **transporteur à vis** ou un **convoyeur à bande** qui remonterait les déblais pour les décharger sur un nouveau convoyeur à bande ou dans un portique permettant de charger des camions.

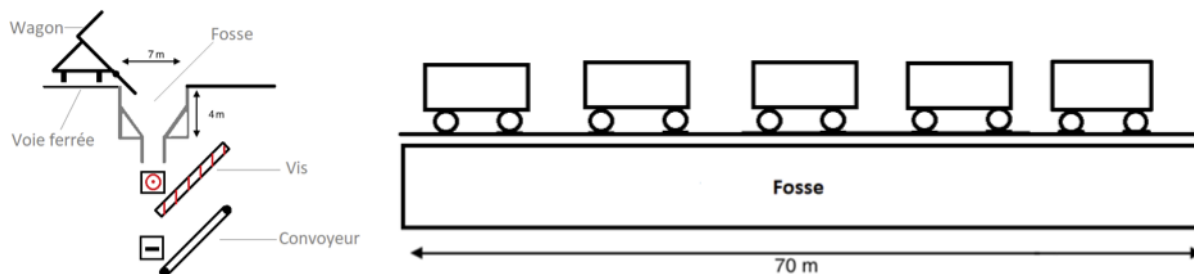


FIGURE 50 – Plan de la fosse

On envisage de créer une nouvelle portion de voie ferrée sur le site de la carrière pour éviter de décharger dans une zone déjà encombrée. Le transport des déblais du quai de déchargement vers les sites à remblayer peut se faire de deux manières : par camion ou sur convoyeur (voir figure 51 pour les aménagements proposés).

Par convoyeur, le nouveau tracé de la voie ferrée permettrait d'éviter de passer au-dessus des infrastructures de traitement de granulats et de stockage déjà existantes et réduirait la distance à parcourir en convoyeur (le convoyeur étant beaucoup plus cher au mètre à l'installation mais également à l'entretien que le mètre de rail). La dernière partie de ce convoyeur serait orientable et offrirait la possibilité de choisir la zone à remblayer. Par camion, l'unique pont reliant les deux parties de la carrière impose une contrainte sur le poids des engins et le choix de ce mode de transport est susceptible de perturber les flux déjà en place (le passage sur le pont étant inévitable). De plus, en estimant les coûts, bien que le convoyeur à bande soit plus cher à l'installation (environ 2 M€ contre environ 0,8 M€ pour l'achat d'un camion), son coût opératoire est moins important que celui de la solution par camions. Le calcul des dépenses totales en prenant en compte

l'actualisation montre qu'à partir de 10 ans d'utilisation, le convoyeur à bande revient moins cher que la solution par camions (ces calculs sont détaillés en **annexe [2]**).

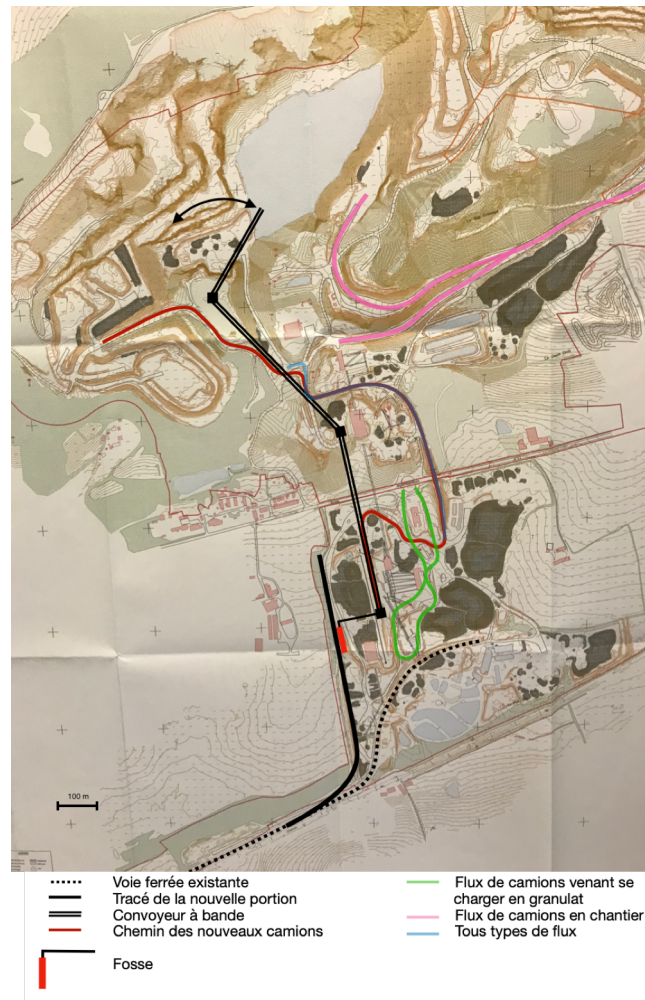


FIGURE 51 – Plan du site de Voutré avec aménagements permettant le déchargement de wagons

Une tout autre solution est de transformer les déblais reçus en boue en y ajoutant de l'eau dans une fosse de forme pavée et de la pomper pour la transporter jusqu'aux espaces à remblayer (voir figure 52 pour un schéma de l'installation). Le coût à l'installation de la pompe (environ 0,7 M€) et son coût opératoire horaire, bien que supérieur à celui du convoyeur, en font la solution qui revient le moins cher sur plus de 50 ans.

Voutré représente donc une opportunité pour l'accueil d'une partie des déblais du Grand Paris Express. Techniquement, l'acheminement des déblais par train ainsi que leur déchargement est envisageable et ce pour des coûts raisonnables et la carrière dispose d'un volume de vide conséquent. Cependant l'accès au train ne représente pas aujourd'hui un avantage compétitif pour Voutré. Aussi longtemps que le camion restera moins cher que le train ou que la Société du Grand Paris n'obligera aucun groupement d'entreprises à faire appel au train, Voutré ne pourra recevoir des déblais qu'en cassant les prix par rapport aux carrières de la région parisienne : même sur certains chantiers disposant d'un accès direct aux voies ferrées, l'évacuation des déblais par train n'est pas la solution retenue.



FIGURE 52 – Schéma du principe du système de déchargement avec pompe

7 Bilan carbone et évaluation

Une fois terminé, le Grand Paris Express permettra une réduction significative des gaz à effets de serre en substituant le métro à la voiture. Mais le chantier en lui-même rejette une quantité importante de CO₂.

En essayant d'être le plus exhaustif possible, nous avons listé toutes les sources de CO₂ liées au chantier, à la fabrication et aux transports des éléments nécessaires pour le tunnel. En quantifiant l'impact de chaque source, à l'aide en particulier de la Base Carbone de l'Agence De l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME), nous avons pu réaliser le bilan carbone du lot T2A. La méthode et les calculs sont détaillés en **annexe [6]**.

Nous avons donc trouvé une **quantité de CO₂ totale pour le lot T2A de 200 000 tonnes**, qui se répartissent comme indiqué sur la figure 53.

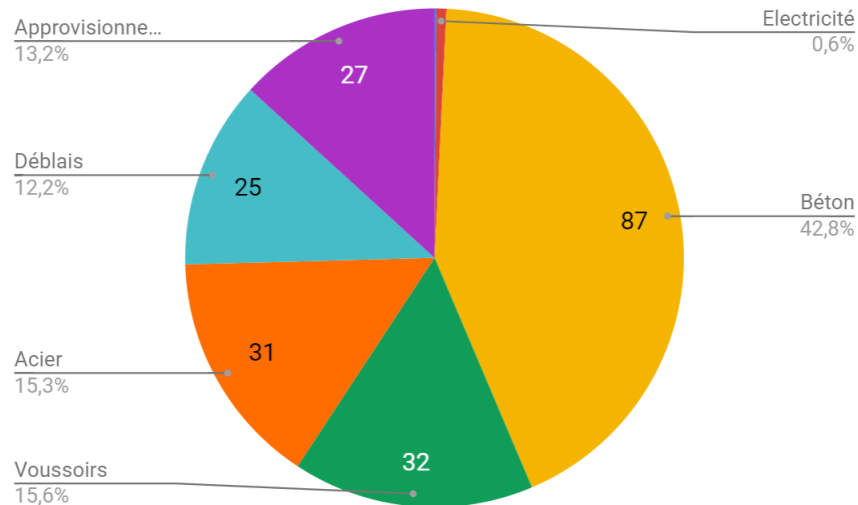


FIGURE 53 – Représentation des sources des émissions de CO₂ du Grand Paris (en kilotonnes)

Ces 200 000 tonnes de CO₂ sont équivalentes aux émissions annuelles de 39 000 français d'après la base de données EDGAR (Emissions Database For Global Atmospheric Research)

On remarque que la majorité du CO₂ est contenu dans le béton et l'acier utilisé. Le groupement d'entreprises n'a que peu de moyens d'intervention sur ces points. De plus, la quantité de CO₂ rejetée sur le site du chantier n'est que de 250 tonnes. C'est pourquoi la pollution atmosphérique ne figure pas parmi les préoccupations les plus importantes du groupement Horizon.

Pourtant, quelques améliorations pourraient être apportées :

- les cloches pour l'entrée en terre des tunneliers sont importées de Chine par bateau, ce qui représente 9,3% des émissions du lot T2A et 70% des émissions liées à l'approvisionnement. Ces cloches auraient pu être produites en France. On constate ici que les aspects économiques prennent le pas sur les considérations environnementales.
- les déblais du chantier sont transportés par barges, ce qui réduit de 65% l'impact environnemental du transport des déchets par rapport à l'utilisation de camions, mais pourraient être transportés par trains, ce qui serait encore plus écologique.
- des dispositifs de captation de CO₂ sur les aciéries et les cimenteries permettraient de réduire les émissions associées aux consommables (béton, acier).

Le calcul du bilan carbone (annexe [6]) nous fournit une première estimation de celui du Grand Paris Express en considérant que le T2A représente 8km sur 200 soit 4%. Ceci est légitime si l'on admet que les émissions supplémentaires s'équilibrent avec celles qui ne sont liées qu'au T2A. En effet, il n'y a pas de station de traitement des boues ailleurs sur le Grand Paris Express, mais les déblais sont plutôt transportés par camion que par barge. On a ainsi une **quantité totale de CO₂ émise pour la construction du Grand Paris Express de 5,1 millions de tonnes**.

En considérant que le Grand Paris Express fera transiter 2 millions de passagers par jour, que le trajet moyen domicile travail est de 27,7km, qu'une voiture particulière émet en moyenne 130g/km de CO₂ et que 40% des actifs utilisent la voiture pour leurs trajets, on obtient que le Grand Paris Express évite une émission de CO₂ de 2900 tonnes par jours. Ainsi la neutralité carbone du Grand Paris Express est achevée en 5 ans.

Conclusion

Lorsqu'on cherche à créer une infrastructure de transport, les tunnels présentent bien des avantages : on ne les voit pas et on ne les entend pas. En milieu urbain, ils permettent de libérer de l'espace en surface, et c'est même bien souvent la seule solution. Mais ils figurent aussi parmi les structures les plus difficiles à réaliser dans les travaux publics.

En effet, le fait de construire sous terre implique une absence de visibilité sur ce qui est fait, mais le problème majeur réside dans les risques d'instabilité : le terrain risque de s'écrouler, créant ainsi un fontis qui peut provoquer des dégâts en surface si le terrain n'est pas maintenu correctement. La sécurité lors du chantier est également plus difficile à assurer que lors de travaux en surface. Par ailleurs, lorsqu'on réalise le creusement d'un tunnel avec un tunnelier, ce qui est le cas le plus fréquent, puisque c'est plus rapide et donc plus économique qu'à l'explosif, une logistique particulière est nécessaire : d'abord au niveau du fonctionnement du tunnelier en lui-même, pour lui apporter les consommables nécessaires à la construction (voussoirs, huile...), mais également au niveau des déblais, qui sont excavés du tunnel, et qui doivent ensuite être stockées à différents endroits en fonction de leur nature.

À cela s'ajoute pour les chantiers du Grand Paris Express les défis posés par le milieu urbain dans lequel sont construits les tunnels : les accès aux chantiers sont plus difficiles, avec des surfaces plus réduites, et la réduction des nuisances est un enjeu de taille.

Plus particulièrement sur le T2A, on rencontre également une géologie très diverse qui renforce le problème de stabilité des sols, ainsi que des infrastructures sensibles tels que des voies de chemin de fer, des écoles et une université avec son centre de recherche.

C'est pourquoi pour réaliser ce tunnel dans les meilleures conditions, de nombreuses solutions ont été apportées, telles que la construction par l'entreprise Herrenknecht d'un tunnelier à densité variable pour ajuster au mieux la pression stabilisant les terrains ou l'évacuation des déblais par voie fluviale retenue par le groupement Horizon pour réduire les flux de camions et l'empreinte carbone du chantier.

De nombreuses innovations peuvent toutefois encore être apportées.

- sur le plan **écologique**, les déblais pourraient être valorisés, en créant par exemple des écrans acoustiques sur les bords des autoroutes et le transport par barge ou par voie ferroviaire devrait être généralisé. Cela permettrait également de réduire les nuisances sonores pour les habitants.
- sur l'aspect de la **sécurité** et de la qualité finale du tunnel, des analyses ondulatoires réalisées par des capteurs le long du tunnel permettraient de détecter les vides, notamment entre les voussoirs et le terrain qui sont particulièrement préoccupants au passage du tunnelier dans une gare, garantissant ainsi l'intégrité du tunnel.
- pour gagner en **productivité**, l'analyse de données en temps réel permettrait d'ajuster les paramètres de creusement au mieux tout au long du chantier. L'automatisation de la pose des voussoirs, du rallongement des conduites ou encore de la conduite des trains sur pneus alimentant le tunnelier pourrait également permettre d'accélérer le creusement.
- sur le plan **technique** enfin, un des objectifs est de trouver une forme et un agencement de voussoirs qui permette la pose des voussoirs en continu en parallèle du creusement, passant d'un fonctionnement alterné entre creusement et pose de voussoirs à un fonctionnement continu, sans complexifier la logistique du tunnelier et des voussoirs ni compromettre la structure du tunnel.

Si le chantier du Grand Paris Express est déjà un défi unique en son genre par ses 200 nouveaux kilomètres de lignes, ces améliorations seront particulièrement importantes par l'augmentation prévisible du nombre de tunnels, à mesure que la population et les besoins en mobilité augmentent et que le changement climatique oblige à repenser les transports. Les transports sont bien souvent en compétition avec le logement pour la superficie en surface : le recours aux tunnels est inévitable pour gagner de la place et réduire les nuisances. En 2017, 55% de la population mondiale vivait dans les villes. En 2050, ce sera plus de 65%. Dans les pays en développement en particulier, les métropoles tentaculaires telles Rio de Janeiro (Brésil), Lagos (Nigeria), Mumbai (Inde) ou Dhaka (Bangladesh) se multiplient et s'agrandissent. À Mumbai, 4 lignes de métro sont en construction, et 6 autres sont en étude. Ainsi, le chantier du Grand Paris Express préfigure très probablement une série de chantiers du même type dans le monde, qui seront d'une ampleur d'autant plus grande que les infrastructures ne sont pas encore bien développées à l'heure actuelle.



ANNEXE

Table des matières

I	Avancer dans le tunnel : technique et optimisation	2
1	Prévision des paramètres opératoires : pression et confinement	2
1.1	Carte géotechnique : Tracé en plan et profil en long du tunnel [1]	2
1.2	Critères de choix du mode de confinement [2]	4
1.3	Hypothèses et Méthode de Calcul des contraintes [3]	5
1.4	Choix du mode de confinement et impact sur le coût économique et énergétique [4]	9
2	Optimisation logistique : gestion du temps et des données	11
2.1	Planning de fonctionnement idéal du tunnelier [1]	11
2.2	Script Java [2]	12
2.3	Planning du chantier [3]	15
2.4	Panier [4]	16
2.5	Tableau de données [5]	17
2.6	Données du logiciel Graphana [6]	18
II	Impacts et risques	20
3	Risques : départ et arrivée du tunnelier en gare	20
3.1	Tableau de comparaison des méthodes d'investigation du sol [1]	20
3.2	Identification des Ondes [2]	21
3.3	Modèle du milieu de propagation d'onde dans le cas simple [3]	22
3.4	Simulation de la propagation d'ondes sismique dans un voussoir avec ferrailage [4]	23
3.5	Simulations : cas de décalage entre les configurations A et B [5]	24
4	Le chantier du Grand Paris et l'environnement	25
4.1	Palissades sur le chantier de la gare Chevilly Trois Communes (ligne 14 sud) [1]	25
4.2	Consommation d'eau sur le T2A [2]	26
5	Gestion des Déblais	27
5.1	Classification des déchets [1]	27
5.2	Calcul des coûts des différentes solutions de déchargement [2]	28
6	Bilan Carbone et évaluation	29
6.1	Méthode utilisée pour réaliser le bilan carbone et détails des calculs	29
	Bibliographie	31

Première partie

Avancer dans le tunnel : technique et optimisation

1 Prédiction des paramètres opératoires : pression et confinement

1.1 Carte géotechnique : Tracé en plan et profil en long du tunnel [1]

La carte ci-dessous nous a servi de support pour la détermination de la pression à imposer en tête de tunnelier ainsi que pour le choix du mode de confinement.

La partie supérieure est une vue aérienne du tracé (en rouge). La partie inférieure est une coupe géologique du tracé. On y retrouve les différentes couches géologiques rencontrées par le tunnelier et les dimensions des bâtiments considérés comme sensibles en surface.

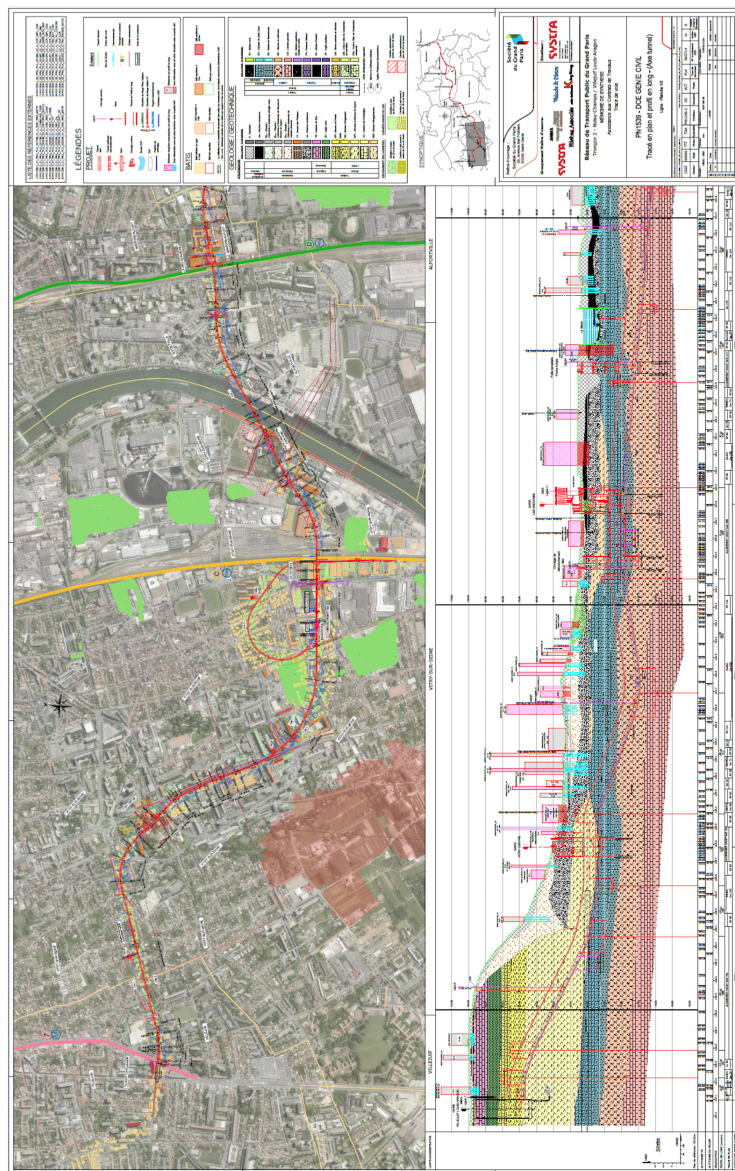


FIGURE 1 – Carte géotechnique du tracé du T2A

Afin d'avoir une vue simplifiée du profil géologique rencontré par le tunnelier, nous avons représenté sur une frise la géologie dans laquelle la machine creuse en fonction de sa position sur le parcours du lot T2A.

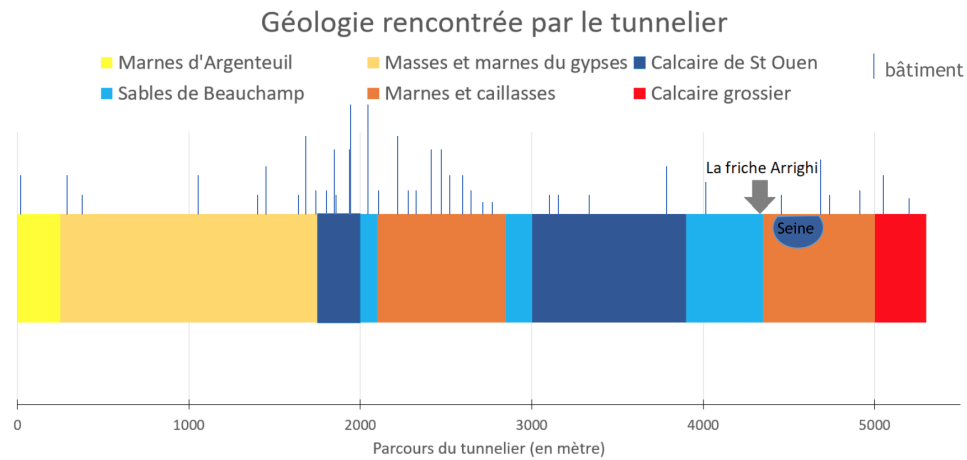


FIGURE 2 – Géologie rencontrée sur le parcours du T2A

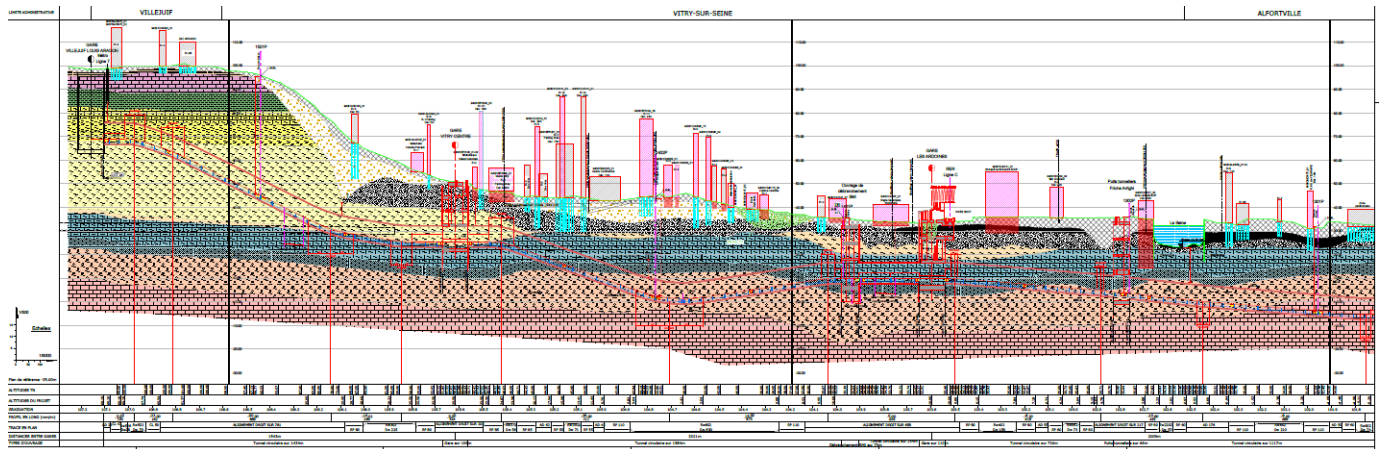


FIGURE 3 – Zoom sur la coupe géologique du tracé du T2A

1.2 Critères de choix du mode de confinement [2]

Pour déterminer quel mode de confinement utiliser sur le tunnelier, nous nous sommes intéressés aux trois critères suivants : la granulométrie, la perméabilité et la cohésion du terrain.

- La **granulométrie** est estimée par le pourcentage de particules extra-fines (<63 microns) dans le matériau. La limite fixée est à **80%**, pourcentage caractéristique des terrains traversés au cours du creusement. Une trop faible teneur en particules extra-fines est défavorable à un confinement par pression de boue car laisse apparaître des vides entre particules, dans lesquels la boue s'infiltrer.
- La **perméabilité** s'exprime en mètres par seconde. Des terrains perméables sont défavorables au confinement par pression de boue car celle-ci peut s'échapper dans le terrain. Nous avons fixé comme critère pour un terrain perméable une perméabilité de **1E-4 m/s**.
- La **cohésion** d'un terrain, caractérisée par son Cu (undrained cohesion), est mesurée en kPa. Nous considérons que des terrains de Cu supérieur à **100 kPa** sont des roches, alors que ceux dont Cu est inférieur à 100 kPa sont défavorables à un confinement par pression de boue, car s'effondrant sous la pression de confinement, laissant des vides dans lesquels s'infiltrer la boue.

	%d'extra fines : < 63 µm	Perméabilité (m/s)	Cu (kPa) (undrained cohesion)	
Marnes d'Argenteuil	90	1,00E-08	180	T = Terre
Masses et marnes du gypse	85	1,00E-07	150	B = Boue
Marnes infragypseuses	85		45	
Calcaire de St Ouen	80	1,00E-05	150	
Sables de Beauchamp	40	1,00E-06	80	
Marnes et caillasses	80	1,00E-03	180	
Calcaire grossier	35		100	
Critère de choix Terre T/ Boue B:	T < 80 % d'extra fines < B	B < 1E-4 m/s < T	T < 100 kPa < B	
	Granulométrie	Perméabilité	Cohésion	Confinement
Marnes d'Argenteuil	B	B	B	Boue
Masses et marnes du gypse	B	B	B	Boue
Marnes infragypseuses	B		T	Boue
Calcaire de St Ouen	B	B	B	Boue
Sables de Beauchamp	T	B	T	Terre
Marnes et caillasses	B	T	B	Boue
Calcaire grossier	T		T	Terre

FIGURE 4 – Tableau du choix du mode de confinement

Remarques

Malgré des caractéristiques géologiques propices à l'utilisation d'un confinement à pression de boue, la **présence de vides dans les marnes et caillasses** traversées nous conduisent à préconiser l'utilisation d'un confinement à **pression de terre**, qui évite la perte de confinement par fuite de la boue dans ces cavités.

De plus, étant donnée **l'implantation initiale de la station de traitement des boues**, la difficulté de la séparation des particules extra-fines avec la bentonite ne joue pas en la défaveur d'un confinement à pression de boue.

1.3 Hypothèses et Méthode de Calcul des contraintes [3]

Détermination de la contrainte horizontale en profondeur

Contrainte : Une contrainte est une force rapportée à une surface. Son unité est le Pascal.

Afin de déterminer la pression à appliquer à l'avant du tunnelier pour creuser, il est nécessaire de calculer la contrainte horizontale σ_h s'exerçant à la profondeur du tunnelier.

Modélisation et hypothèses :

- La contrainte horizontale est la somme d'une contrainte horizontale due à la pression du terrain et d'une contrainte horizontale hydrostatique, le tunnelier étant toujours situé sous la nappe d'eau.

- Nous n'avons pas utilisé la méthode d'équilibre limite mais nous nous sommes restreints à un modèle plus élémentaire où la contrainte à une profondeur donnée est la somme des contraintes des éléments situés directement au-dessus.

- La contrainte horizontale du terrain est liée à sa contrainte verticale par un facteur K_0 : $\sigma_h = K_0 \sigma_v$.

- La contrainte verticale du terrain est égale à la somme de chacune des contraintes générées par les couches au-dessus à laquelle on ajoute une contrainte due aux éventuels bâtiments situés en surface.

- On ne considère que les bâtiments situés directement à la verticale du point considéré, et non ceux situés à côté, alors que ceux-ci ont en réalité une influence. Cela est discuté à la fin de cette annexe.

Contrainte verticale d'une couche géologique sèche

Il faut considérer le poids volumique γ_s du matériau sec, égal à la densité de celui-ci multiplié par l'intensité du champ de pesanteur. La contrainte verticale exercée par une hauteur h de ce matériau sera alors $\sigma_v = \gamma_s h$

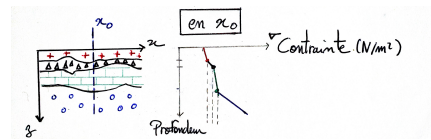


FIGURE 5 – Évolution de la contrainte avec la présence d'une nappe d'eau

Contrainte verticale d'une couche géologique humide

Pour une couche située en dessous de la nappe d'eau, on considère le poids volumique déjaugé du matériau γ' , égal à la différence entre son poids volumique *in situ* (en état), et le poids volumique de l'eau. Ceci s'explique par le fait que l'eau absorbe une partie de la contrainte verticale, et la restitue ensuite indépendamment sous forme de contrainte horizontale. On obtient donc $\sigma_v = \gamma' h$

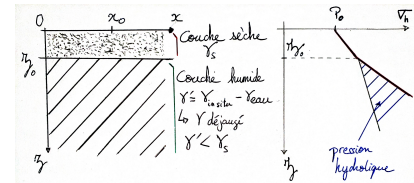


FIGURE 6 – Évolution de la contrainte avec la présence d'une nappe d'eau

Contrainte verticale d'un bâtiment

On calcule cette contrainte en commençant par calculer la force qu'exerce le bâtiment sur le sol, égale à son poids; on considère qu'un bâtiment exerce une contrainte de $50 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-2}$ par étage, ordre de grandeur que l'on obtient facilement si l'on considère une salle de $4 \times 4 \text{ m}^2$, 3 m de haut, aux murs de bétons d'épaisseur 30cm et de densité 2 (valeurs usuelles). Cette force se conserve en s'enfonçant, mais sa surface d'application se diffuse selon un angle de 27° .

La formule de la contrainte d'un bâtiment de longueur L et de largeur l à une profondeur z devient alors

$$\sigma(z) = \frac{Mg}{(l + 2z \tan(27))(L + 2z \tan(27))}$$

avec M la masse du bâtiment.

Contrainte horizontale restituée par la nappe

Cette contrainte se calcule comme précédemment :

$$\sigma_h = 1000 \cdot g \cdot h$$

avec h la hauteur de la nappe d'eau au-dessus du point considéré, le facteur 1000 étant la densité de l'eau

Finalement, on obtient une formule du type

$$\sigma_{total} = K_0(\sigma_{sec} + \sigma_{humide} + \sigma_{btiments}) + \sigma_{horizontal,eau}$$

Où on peut calculer chaque terme facilement dans la mesure où l'on connaît la densité et la hauteur de chaque couche géologique, ainsi que les caractéristiques des bâtiments en surface.

Discussion des hypothèses formulées

Non prise en compte des bâtiments n'étant pas directement à la verticale du point considéré :

La contrainte des bâtiments en surface ayant une diffusion horizontale, il faudrait en toute rigueur prendre en compte l'effet des bâtiments à proximité du passage du tunnelier.

Supposons que le tunnel passe à 20 m de profondeur dans le « cône de diffusion » du poids d'un bâtiment de 20 m de haut pour 20 m de large tel que le tunnel ne passe pas directement à la verticale de ce bâtiment. La contrainte s'exerçant en profondeur est de l'ordre 0,4 bar, ce qui n'est pas négligeable, surtout quand on considère que le tunnel passe sous des zones de forte densité urbaine. Cependant, cela compliquait beaucoup les calculs le long de la traversée du tunnel et demande accès aux informations de tous les bâtiments au voisinage de la verticale du tunnel qui ne sont pas toujours accessibles.

Surestimation de la contrainte :

En considérant que la contrainte horizontale est proportionnelle à la somme des pressions des couches la surplombant, on fait une approximation assez grossière du comportement réel des matériaux. En réalité, la contrainte horizontale ne dépend que des roches situées dans un volume donné par la méthode d'équilibre limite. Cette méthode n'est pas détaillée ici. Notre approximation reste pertinente, mais elle surestime grandement la contrainte en profondeur, c'est pourquoi on obtiendra par la suite des pressions allant jusqu'à 7bar là où en réalité elle ne dépasse pas les 4bar.

Cependant l'intérêt de notre modélisation repose avant tout sur la représentation des variations de pression. Même si les valeurs de pression obtenues sont surestimées, elle permet de mettre en évidence l'influence des paramètres géologiques et d'urbanisme sur les conditions de fonctionnement du tunnelier.

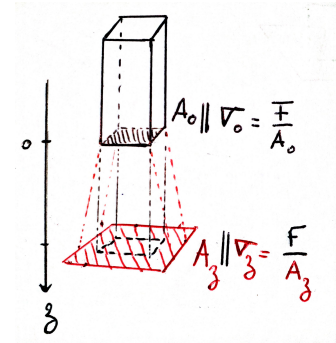


FIGURE 7 – Évolution de la contrainte avec la présence d'une nappe d'eau

Etablissement du profil de pression à partir des données géotechniques du terrain

On a vu dans l'annexe précédente que le calcul des contraintes peut se résumer à une formule du type :

$$\sigma_{total} = K_0 \cdot (\sigma_{sec} + \sigma_{humide} + \sigma_{batiments}) + \sigma_{horizontal,eau}$$

Notre calcul de la pression en profondeur repose sur cette formule et des données fournies par la Société du Grand Paris dans le mémoire de synthèse géologique, géotechnique et hydrogéologique. En particulier, on peut supposer, en bonne approximation, que tous les K_0 sont égaux à 0,5 et on retiendra cette valeur. Nous avons également eu accès aux données de densité in situ et à sec de chaque couche géologique intervenant dans le projet T2A et à une coupe géologique du terrain faisant apparaître chaque couche avec sa hauteur et les bâtiments en surface.

Avec ces données et notre calcul, nous avons pu établir les pressions sur un certains nombre de points en haut et en bas du tunnel, ainsi qu'éventuellement sur un « point de transition » si le tunnelier traverse deux couches géologiques. On obtient ainsi pour chaque point considéré des profils de pression de la forme :

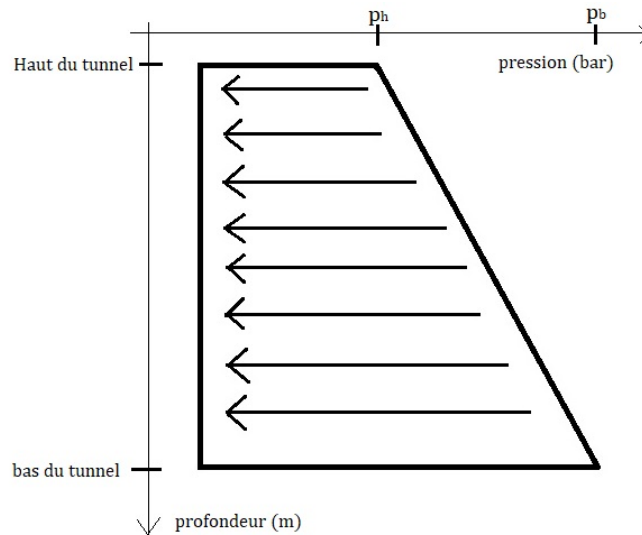


FIGURE 8 – Représentation du profil de pression existant à l'avant du tunnelier

La pente dépend linéairement de la densité de la couche traversée.

Ce profil nous renseigne sur la pression qu'il est nécessaire d'appliquer en tête du tunnelier, mais aussi la densité de boue qu'il faut avoir dans la chambre d'excavation lorsqu'on est en mode pression de boue : en effet, agir sur la densité de la boue permet de compenser la variation de pression dans le sol et diminue le risque de déstabilisation du sol et donc de refoulement ou d'effondrement en surface.

Lorsque le tunnelier est à la limite entre deux couches, on peut avoir des profils du type :

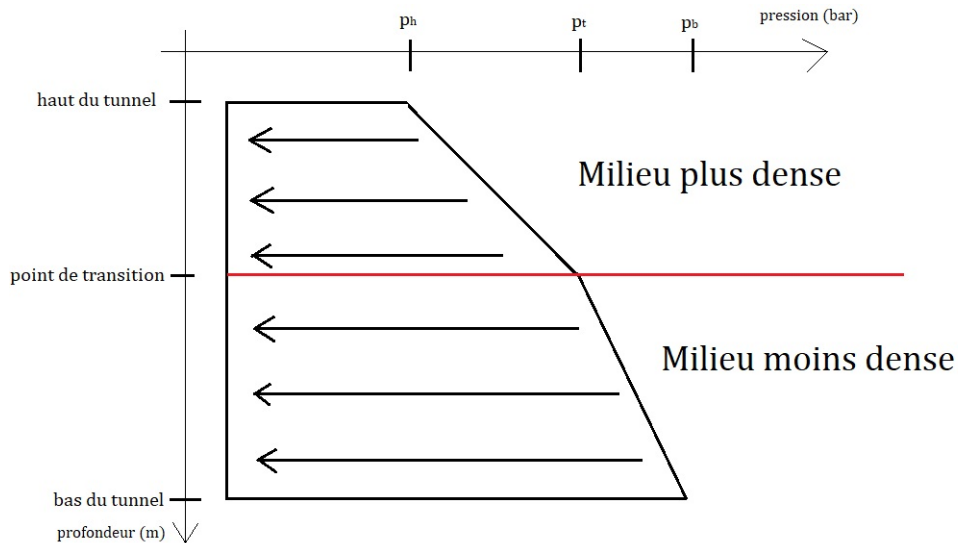
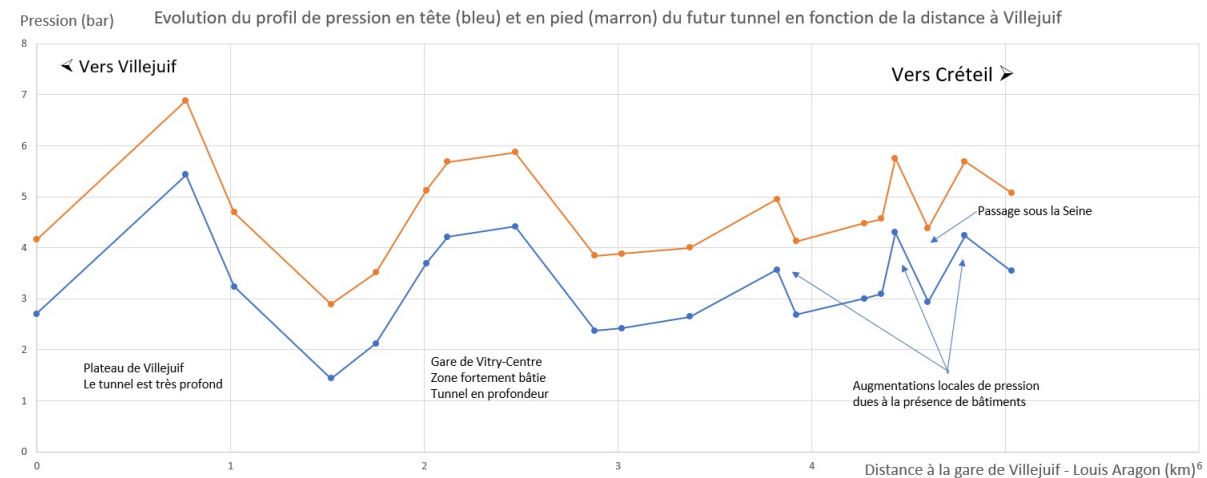


FIGURE 9 – Représentation du profil de pression en tête du tunnelier lors du passage entre deux milieux de nature différente

Dans ce cas-là, on opte en général pour un fonctionnement en pression de terre.

En calculant les valeurs de pression en plusieurs points du trajet du tunnelier, on peut obtenir une représentation des pressions en haut et en bas du futur tunnel entre les futures stations Villejuif - Louis Aragon et le Vert-Maison :



On observe que la pression augmente bien dans les zones profondes et les zones où la densité d'habitation est importante. On a également mis en évidence à proximité de la Seine des augmentations très locales de pression en dessous de bâtiments, en particulier de bâtiments sensibles comme une installation EDF.

1.4 Choix du mode de confinement et impact sur le coût économique et énergétique [4]

Comparaison énergétique

On veut évaluer l'influence du choix du confinement à pression de terre et du confinement à pression de boue sur la consommation énergétique du projet.

Pour ce faire, on évalue le coût énergétique d'un creusement de 100m par les deux types de tunneliers. On utilise cette valeur pour calculer l'énergie consommée sur l'intégralité du projet à l'aide des prévisions des modes de fonctionnements utilisés. On fait ensuite varier l'utilisation prévue du tunnelier pour voir l'impact sur le coût énergétique (augmenter les trajets du pression de terre et diminuer ceux du pression de boue...).

Hypothèses : On considère que l'intégralité de la consommation électrique provient du **couple moteur exercé par la tête de coupe**. En effet, le traitement des boues se fait dans les deux cas et ne sera pas un élément discriminant puisque l'on utilise un tunnelier à densité variable. De même, on néglige la puissance développée par la vis d'Archimède puisque elle aussi fonctionne dans les deux cas.

On relève à l'aide de ce graphique fourni par l'entreprise Herrenknecht le couple moteur des tunneliers :

20.06.2017

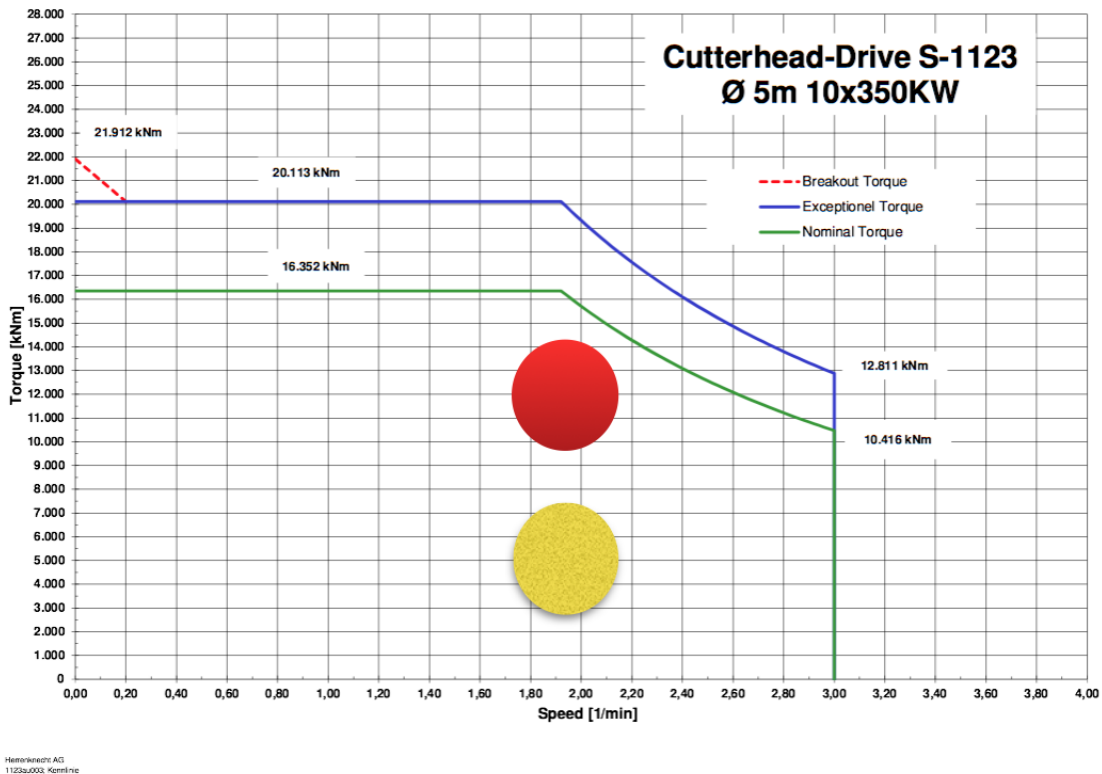


FIGURE 10 – Zone de fonctionnement du couple de la roue de coupe en fonction de sa vitesse de rotation en confinement à boue (en jaune) et à terre (en rouge)

Sachant que les tunneliers creusent à une vitesse de 2 tours/minute et qu'ils creusent 1,8m/heure on peut facilement calculer la puissance déployée ainsi que le temps employé pour creuser 100m. On en déduit l'énergie consommée sur 100m par type de tunnelier en prenant en ordre de grandeur significatif 13MN.m pour un confinement à pression de terre versus 5MN.m pour un confinement à pression de boue.

Nos prévisions technique prévoient que sur le tronçon de 5,3km, 4,1 km seront creusés à la pression de boue et 1,2 km à la pression de terre.

On en déduit que le projet a une consommation totale de 15 TJ.

Influence de l'utilisation du confinement à pression de boue :

Si on avait creusé l'intégralité des 5,3km à la pression de terre, on aurait eu une consommation de 29 TJ, soit le double. Si on avait simplement augmenté les trajets au tunnelier de terre de 30% (1560km à pression de terre, 3740 à pression de boue), on aurait une consommation de 16 TJ, soit 1 TJ supplémentaire. L'utilisation du mode de confinement à pression de terre quand on dispose de notre tunnelier à densité variable est plus consommatrice en énergie qu'un confinement à pression de boue.

Comparaison économique

On souhaite désormais comparer le coût économique des deux types de tunneliers.

Au prix de l'électricité consommée, calculée dans la dernière partie, s'ajoute le coût de **changement des molettes**. En effet, les molettes du tunnelier à pression de terre s'usent deux fois plus vite que celles du tunnelier à pression de boue. La démarche comparative est la même que dans la partie énergétique.

Hypothèses : On néglige le coût du traitement des boues puisque dans le cadre du T2a, on utilise un tunnelier à densité variable ; la station de traitement des boues étant déjà installée et le traitement de la boue se faisant dans les deux cas, ces coûts ne rentrent pas en compte dans notre étude.

Le prix du kWh pour les industriels étant de 0,08197€ (données fournies par EDF), on calcule facilement le prix de l'électricité consommée.

Quant aux molettes, sachant qu'il faut changer une molette lorsqu'elle a creusé 800 m^3 pour la pression de terre et 1600 m^3 pour la pression de boue, on trouve qu'il faut changer 0,4 molettes par mètre pour la pression de boue et 0,2 molettes pour la pression de terre. Ainsi, puisque les molettes se changent par 8, on en déduit qu'il faut s'arrêter tous les 20m pour la pression de terre et tous les 40m pour la pression de boue.

Avec nos prévisions, puisque les molettes coutent 3500€ à remplacer, il faudra 1,7M€ pour les molettes pour les 1,2km de creusement en pression de terre et 2,9M€ pour les 4,1km de creusement en pression de terre. Cela induit un coût total de 4,6M€ pour les molettes. Le projet T2a coûtera en molette et en énergie 4,95M€ selon nos prévisions.

Influence de l'utilisation du mode de confinement à pression de boue :

Si on avait creusé l'intégralité des 5,3km à la pression de terre, on aurait payé 7,4M€ de molettes sur tout le projet. On y ajoute le coût électrique : cela porte le prix à 8M€.

Si on avait simplement augmenté les trajets au tunnelier de terre de 30% (1560km au pression de terre, 3740 au pression de boue), on aurait payé 4,8M€ de molettes, et 5,18M€ en y ajoutant l'électricité, soit environ 200 000€ de plus. L'utilisation du tunnelier à pression de boue permet d'abaisser les coûts d'utilisation du tunnelier.

2 Optimisation logistique : gestion du temps et des données

2.1 Planning de fonctionnement idéal du tunnelier [1]

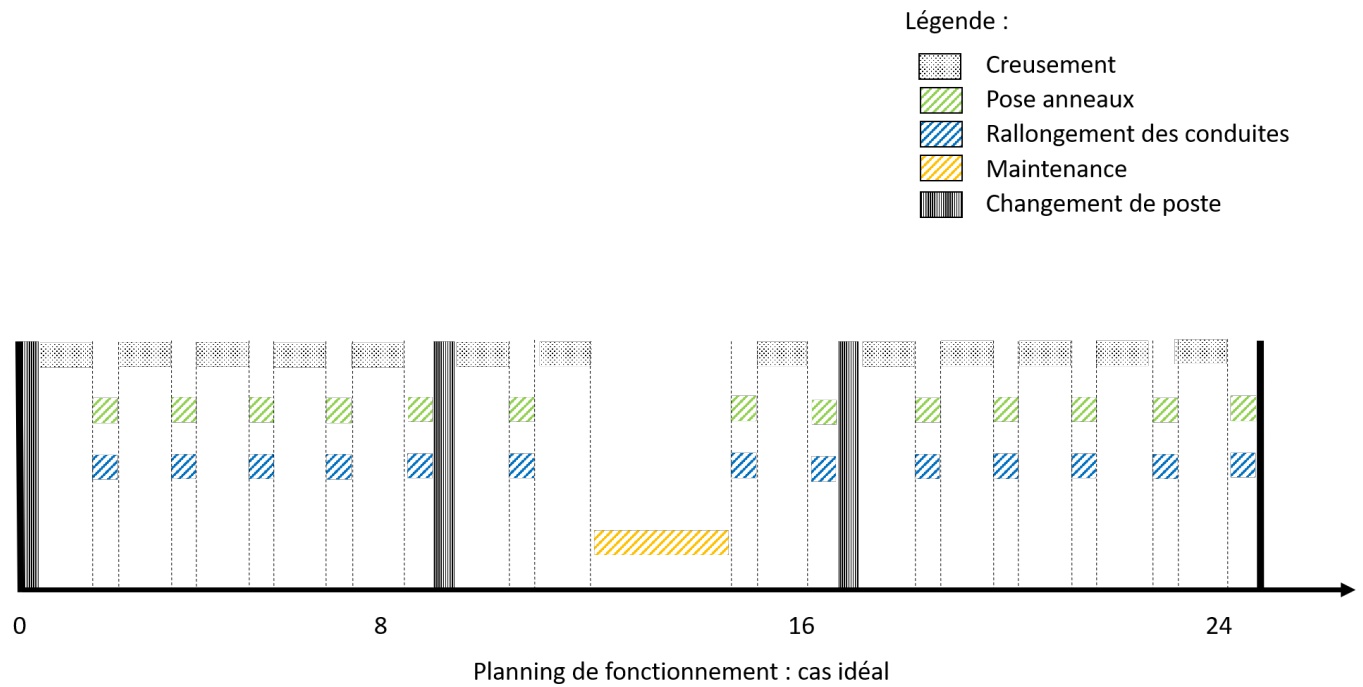


FIGURE 11 – Planning de fonctionnement idéal du tunnelier

2.2 Script Java [2]

```
package tbm;
import java.util.*;

public class tbm {
    double longueurConduite = 6.0;
    double vitesse = 0.045;
    int pauseVoussoir = 30;
    double longueurAnneux = 1.8;
    int nombreAnneau = 1;
    tsp tspSuivre = null;
    boolean pause = false;
    double tbmPosition = 0.1;

    public static void main(String arg[]) {
        int i;
        for(i=0;i<40;i++){
            tbm myTBM = new tbm();
            myTBM.creuse(3000+i*100);
        }
    }

    void creuse(double distance) {
        double tempt = 0;
        double temptExcavation = 0;
        double temptConduitePause = 0;
        double temptRingPause = 0;
        tsp tsp1 = new tsp(1);
        tsp tsp2 = new tsp(1);

        while(tbmPosition < distance) {
            if(!((tsp1.occupe)&&(tsp2.occupe)) { //garantir qu'il y a toujours un tsp qui roule
                if(tsp1.occupeAvant == true) {
                    tsp2.occupe = true;
                }
                else {
                    tsp1.occupe = true;
                }
                tsp1.occupeAvant = tsp1.occupeAvant;
                tsp2.occupeAvant = tsp2.occupeAvant;
            }

            if(tsp1.occupe == true) {
                if(tsp1.suivre == true) {
                    tsp1.position = tbmPosition;
                }
                else {
                    tsp1.position += Math.pow(-1.0, tsp1.sens)*tsp1.vitesse;
                    if(tsp1.position <= 0) {
                        tsp1.occupe = false;
                        tsp1.sens = 0;
                    }
                    if(tsp1.position >= tbmPosition) {

```

```
        tsp1.suivre = true;
        tspSuivre = tsp1;
    }
}

if(tsp2.occupe == true) {
    if(tsp2.suivre == true) {
        tsp2.position = ttmPosition;
    }
    else {
        tsp2.position += Math.pow(-1.0, tsp2.sens)*tsp2.vitesse;
        if(tsp2.position <= 0) {
            tsp2.occupe = false;
            tsp2.sens = 0;
        }
        if(tsp2.position >= ttmPosition) {
            tsp2.suivre = true;
            tspSuivre = tsp2;
        }
    }
}

if(pause == false) {
    ttmPosition += vitesse;
    longueurConduite -= vitesse;
    if(longueurConduite <= 0 || ttmPosition > (nombreAnneau*longueurAnneux)) {
        pause = true;
    }
    tempExcavation++;
}
else {
    if(tspSuivre != null) {
        if(longueurConduite > 6) {
            tempt += 17;
            tspSuivre.suivre = false;
            tspSuivre.sens = 1;
            nombreAnneau++;
            temptRingPause += tspSuivre.temptVoussoireCharge;
            tspSuivre = null;
            pause = false;
        }
        else {
            longueurConduite += tspSuivre.conduite;
            if(longueurConduite > 0) {
                pause = false;
            }
            tempt += (tspSuivre.temptVoussoireCharge + tspSuivre.temptConduiteCharge - 1);
            tspSuivre.suivre = false;
            tspSuivre.sens = 1;
            nombreAnneau++;
            temptRingPause += tspSuivre.temptVoussoireCharge;
            temptConduitePause += tspSuivre.temptConduiteCharge;
            tspSuivre = null;
        }
    }
}
```



```
    }
    }
    }
    }
    }

    System.out.println("temps attendre tsp : " + (temps-tempsExcavation-tempsRingPause-tempsConduitePause)/60 + "heure" + "
pourcentage : " + (temps-tempsExcavation-tempsRingPause-tempsConduitePause)*100/temps + "%");

}

}

class tsp {
    int conduite;
    boolean occupe;
    boolean occupeAvant;
    double tempsVoussoireCharge;
    double position;
    double vitesse;
    double tempsConduiteCharge;
    boolean suivre; //tsp atteint la position de tbm, et le suit
    int sens;
    public tsp(int type) {
        if(type == 1) { //tsp transporte voussoir et conduite
            conduite = 6; //longeur de conduite il peut apporter
            occupe = false; //si il roule
            tempsVoussoireCharge = 18;
            tempsConduiteCharge = 36;
            sens = 0;
            position = 0;
            suivre = false;
            vitesse = 160;
        }
        else { //tsp transporte seulement voussoire
            conduite = 0;
            occupe = false;
            tempsVoussoireCharge = 18;
            sens = 0;
            position = 0;
            suivre = false;
            vitesse = 160;
            tempsConduiteCharge = 0;
        }
    }
}
}
```

2.3 Planning du chantier [3]

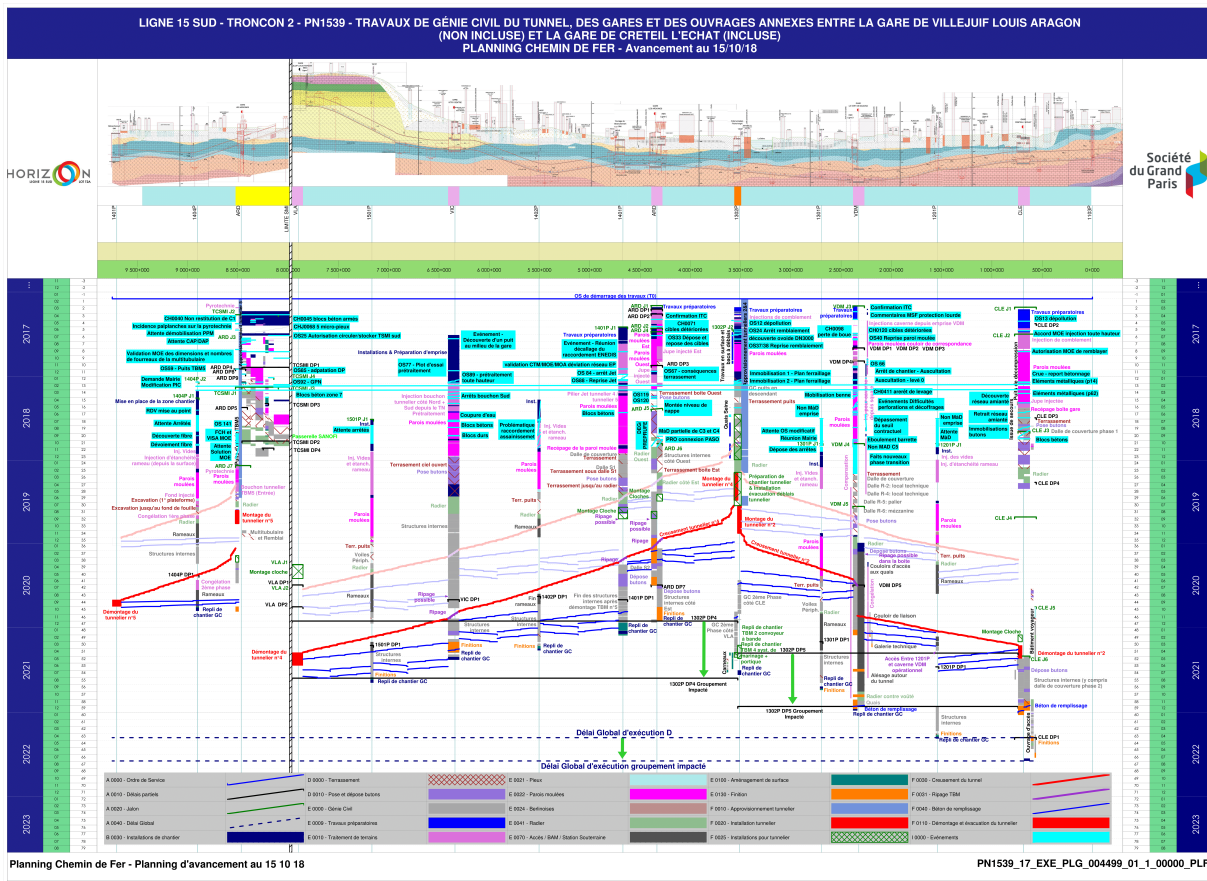


FIGURE 12 – Planning de chantier

2.4 Panier [4]

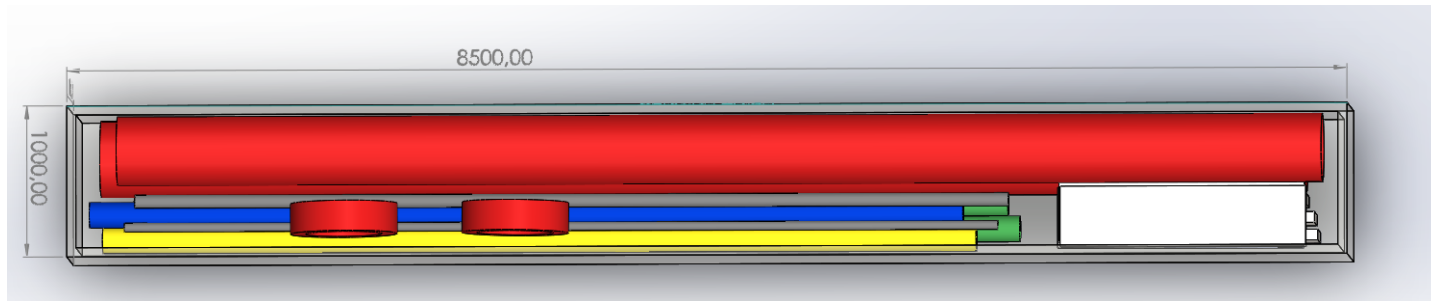


FIGURE 13 – Panier vue du dessus

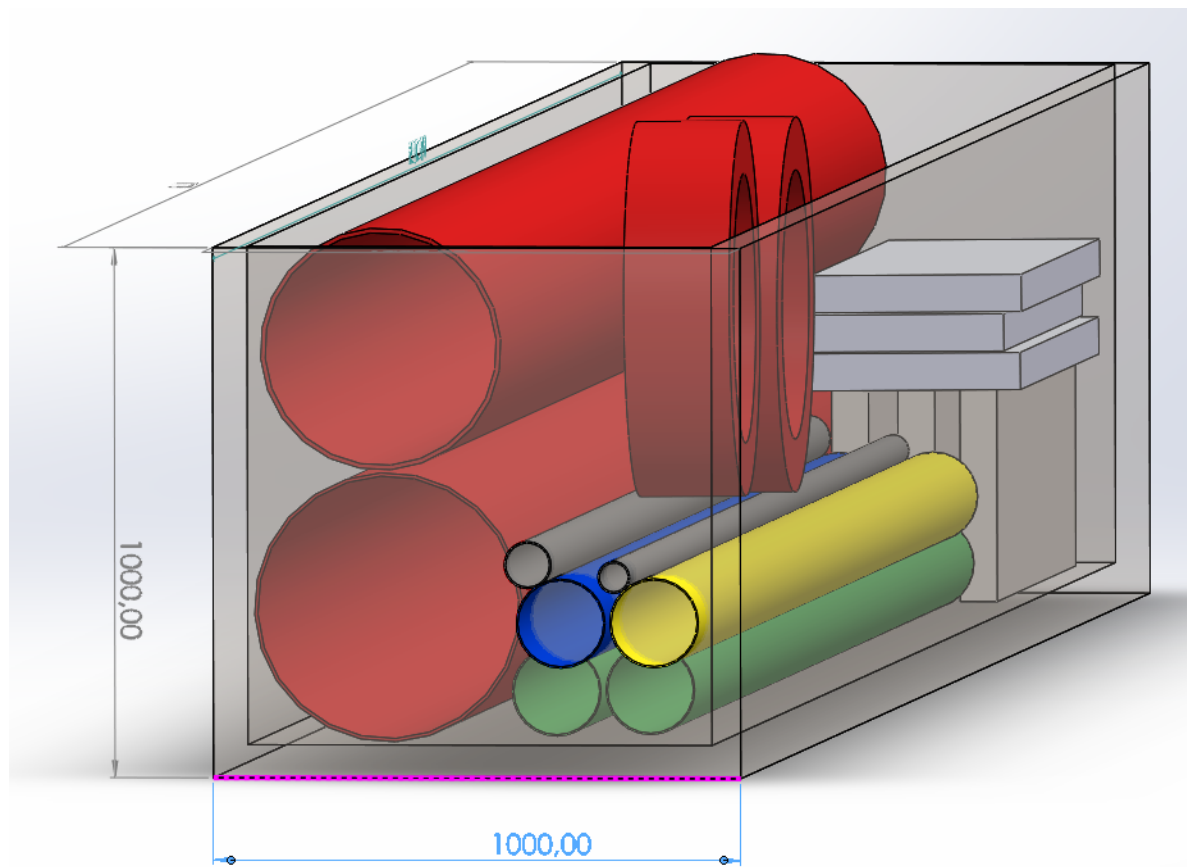


FIGURE 14 – Panier vue de coté

2.5 Tableau de données [5]

Ce tableau nous a été donné par tunneLab. Pour mieux comprendre le sens physique des données, il est nécessaire de donner quelques explications supplémentaires : Les pressions sont négatives ou nulles car elles sont mesurées à partir d'une tare à 0 bar lorsque l'érecteur se positionne au dessus du voussoir. La donnée enregistrée est donc la valeur de la dépression fabriquée par la pompe à vide de l'érecteur. Les données ERECT_ON, CH_RUN et ERECT_VACUUM_PU_RC sont des simples valeurs binaire. Elles s'activent et de désactivent manuellement, lorsqu'un opérateur tourne la clé correspondant. Elles ne permettent donc pas de définir les cycles de pose des anneaux. Nous avons d'ailleurs observé que le mode ERECT_ON était souvent désactivé longtemps après la fin de la pose des anneaux, et même parfois activé par erreur pendant des phases de creusement. Au total, le mode ERECT_ON est activé 145 fois pour 90 anneaux, ce qui montre bien que cette donnée ne peut pas être bien exploitée dans le cadre de notre étude.

Variable	Description	Unité	Min	Max
PX_RING_NO	Numéro de l'anneau		10	100
PX_CLE_INSTALL	Position de la clé		1	14
TC_SPEED	Vitesse d'avancement du tunnelier	mm/min	0	100
TC_EXCAV_ON	Mode excavation activé		0	1
CH_SPEED	Vitesse tête de coupe	rpm	0	100
CH_RUN	Tête de coupe en fonctionnement		0	1
CH_ANGLE	Angle tête de coupe	Degrés	0	360
CH_ROT_DIR	Sens de rotation		0 (horaire)	1 (antihoraire)
ERECT_ON	Mode érecteur activé		0	1
ERECT_SEG_NUM	Numéro du voussoir		1	7
ERECT_VACUUM_PU_RC	Vide de l'érecteur activé		0	1
ERECT_VAC_CENTER_PF	Pression au centre de l'érecteur	bar	-30	0
ERECT_VAC_SIDE_PF	Pression en bordure de l'érecteur	bar	-30	0
TC_ELONG_i (i=1..7)	Elongation de la paire de vérins i	mm	0	2700
ERECT_ANG_POS	Position angulaire de l'érecteur	Degrés	0	360

FIGURE 15 – Tableau des données

2.6 Données du logiciel Graphana [6]

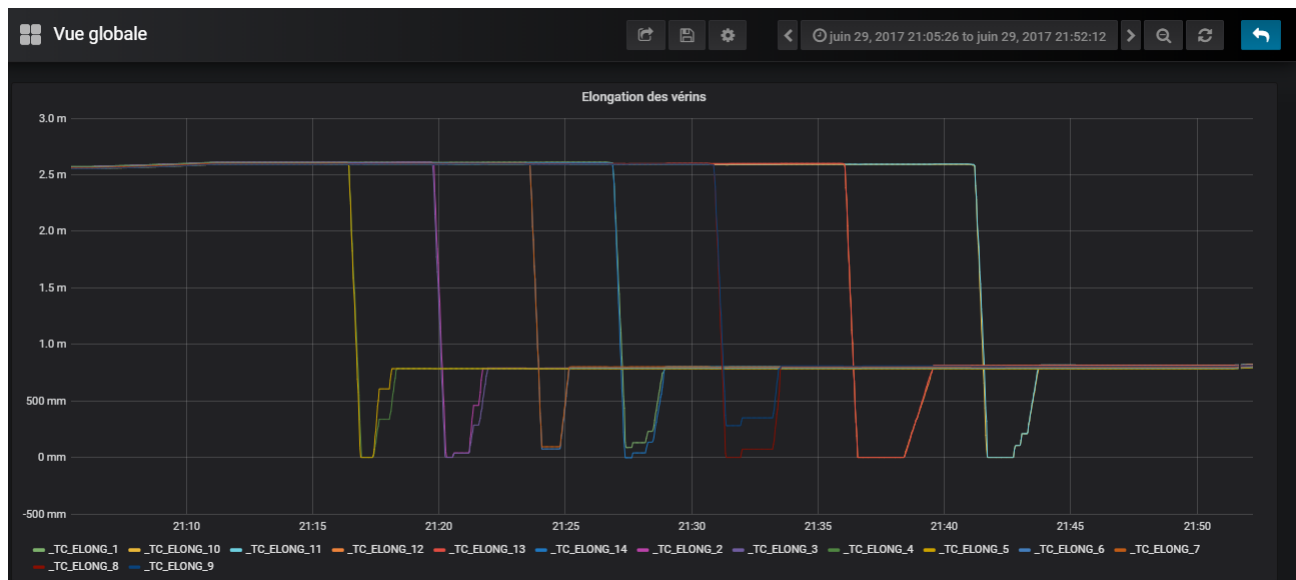


FIGURE 16 – Temps inférieur à 35 minutes

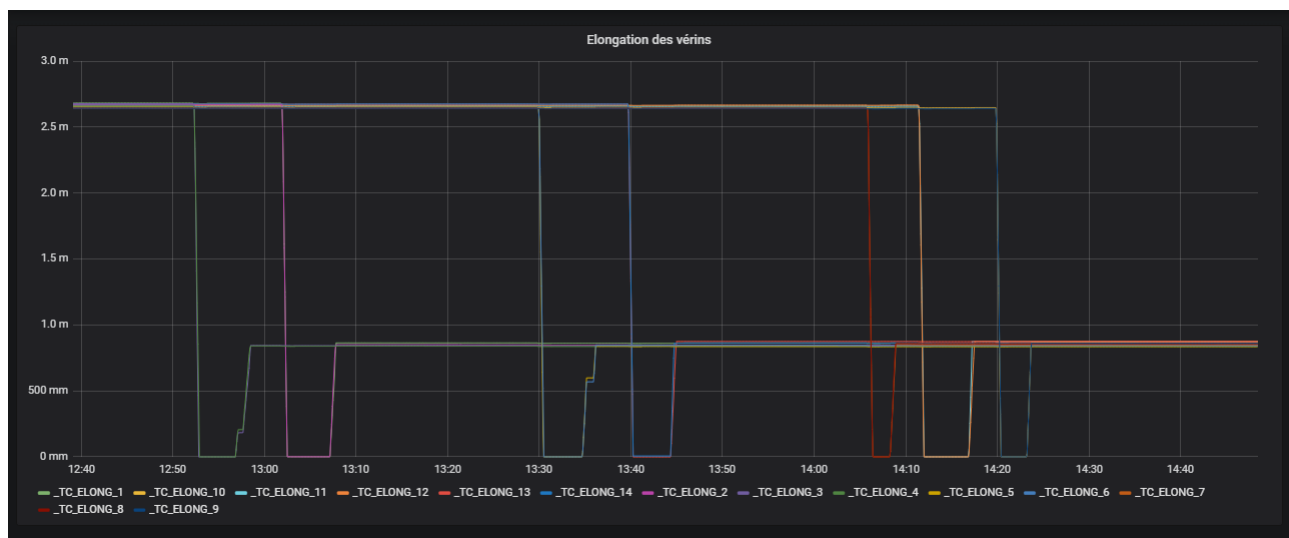


FIGURE 17 – Temps supérieur à 35 minutes

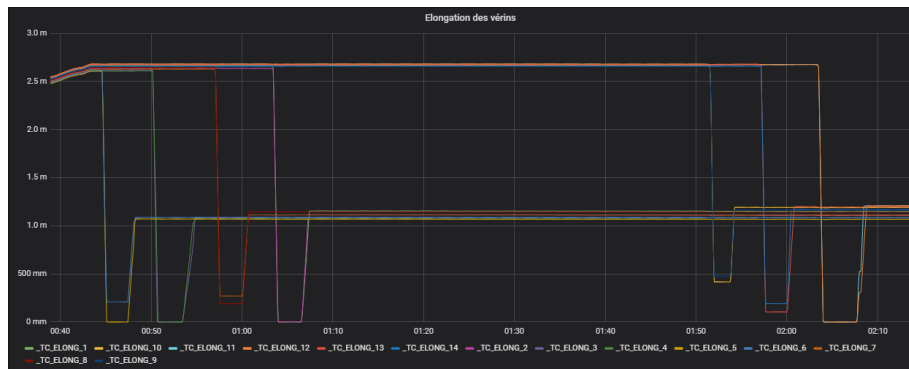


FIGURE 18 – Pause(s) au cours de l'opération



FIGURE 19 – Voussoir cassé ou à remplacer

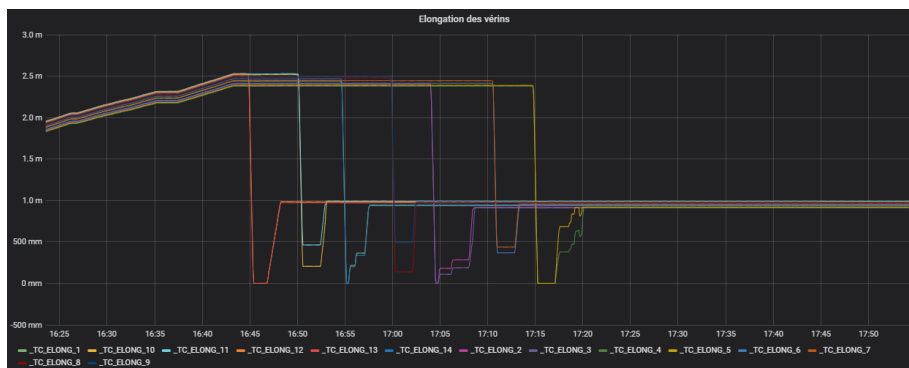


FIGURE 20 – Exemple de cas unique

Deuxième partie

Impacts et risques

3 Risques : départ et arrivée du tunnelier en gare

3.1 Tableau de comparaison des méthodes d'investigation du sol [1]

Méthode	Principe	Informations fournies	Applications à la détection de vides dans le mortier
Gravimétrie	Mesure des variations locales du champ de pesanteur	Variations de g	Les vides dans le mortier seront masqués par toutes les anomalies dues à la présence du tunnel et du tunnelier dans le sol
Radar à pénétration de sol (géoradar)	Ondes EM hautes-fréquences envoyées dans le sol. La vitesse de propagation dépend de la constante diélectrique du milieu	Les ondes retour indiquent les réflexions et donc les changements de milieu	Cette méthode est perturbée par la présence de métal dans le voussoir (ferraillage) et les ondes utilisées s'atténuent très vite dans les vides
Imagerie électromagnétique	Le principe est le même avec des OEM basses fréquences . On étudie alors plus leur diffusion que leur propagation	De même, les ondes retour permettent de repérer les changements de milieu	Cette méthode n'est pas aussi sensible que la précédente aux métaux et n'est pas atténuée par la présence de vide mais la résolution reste faible
Ondes sismiques	Émission d' ondes acoustiques dans le sol. Le principe et les équations sont les mêmes que pour le géoradar	Les ondes retour indiquent les changements de milieu	On installe un émetteur et des récepteurs d'ondes acoustiques le long d'un voussoir
Carottage	On carotte le tunnel sur 70 cm pour voir directement la qualité du mortier injecté	On évalue directement la qualité de l'échantillon	Mise en œuvre plus délicate que pour les autres méthodes car nécessité de percer le tunnel et de le reboucher

3.2 Identification des Ondes [2]

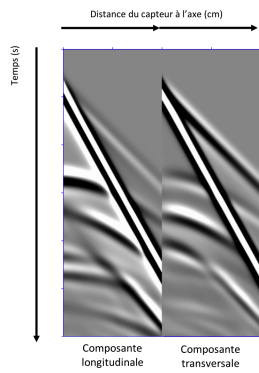


FIGURE 21 – Lecture d'un enregistrement

Avant de procéder à des modélisations plus concrètes de l'expérience théorique précédemment décrite, nous réalisons une simulation d'émission d'ondes dans un terrain simplifié ne présentant que l'interface entre les voussoirs et le sol excavé. Les résultats de cette modélisation nous permettent d'identifier les ondes S et P directes ainsi que leurs réflexions successives. En superposant les modèles théoriques (correspondant au temps de détection en fonction de la distance à l'axe du capteur) avec les simulations enregistrées, nous parvenons à identifier les signaux reçus.

Nous utilisons d'abord un modèle d'onde acoustique sur lequel nous parvenons à identifier l'onde directe P, sa première et sa deuxième réflexion.

Ensuite, nous utilisons un modèle plus réaliste d'onde élastique. Sur ce modèle, les ondes S sont visibles sous forme d'un train d'onde (avec une vitesse de groupe et de phase) et rendent les ondes P plus difficiles à identifier.

Il est également possible d'obtenir une modélisation de l'évolution de l'onde et de ses réflexions au cours du temps sous forme de suite d'images correspondant à des instants différents. Nous pouvons notamment y identifier les ondes directes et réfléchies au niveau des interfaces décrites précédemment.

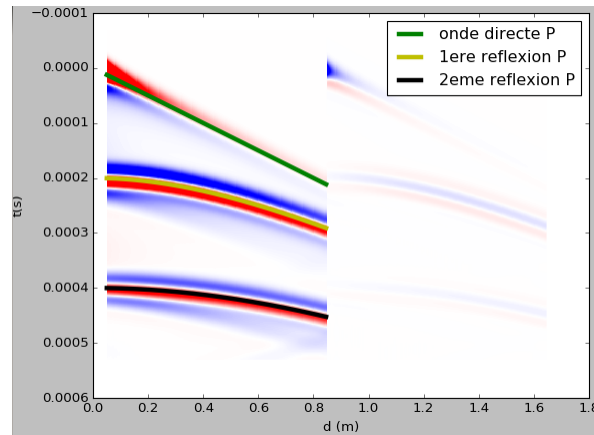


FIGURE 22 – Modèle théorique de dispersion d'ondes acoustiques

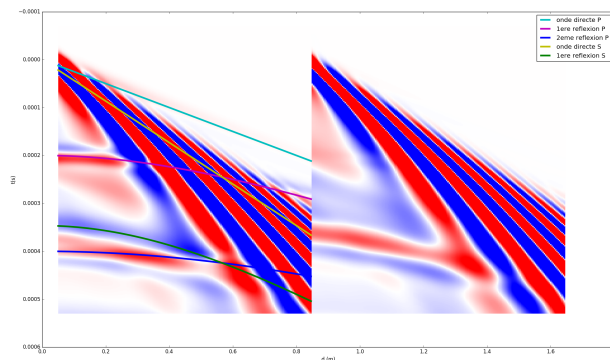


FIGURE 23 – Modèle théorique de dispersion d'ondes élastiques

3.3 Modèle du milieu de propagation d'onde dans le cas simple [3]

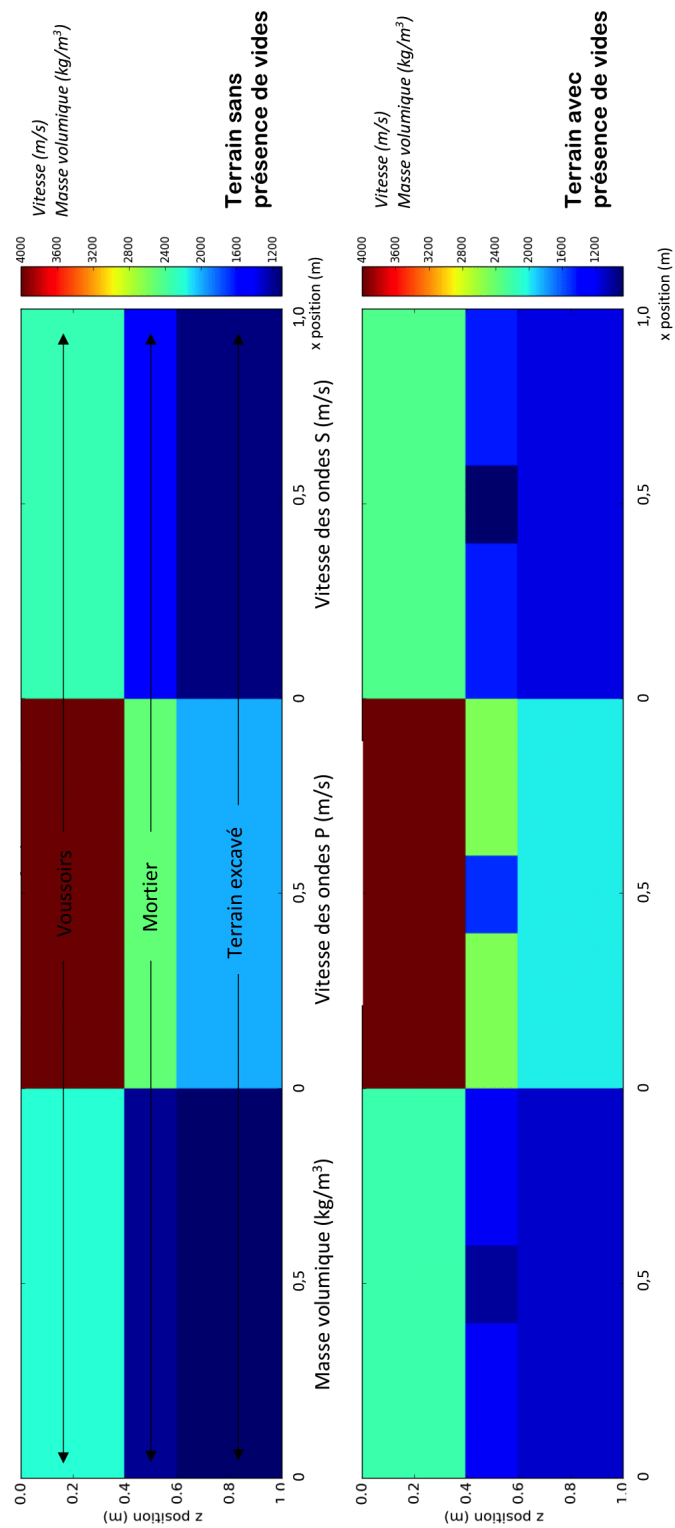


FIGURE 24 – Modèle du milieu de propagation des ondes : cas sans ferrailage

3.4 Simulation de la propagation d'ondes sismique dans un voussoir avec ferrailage [4]

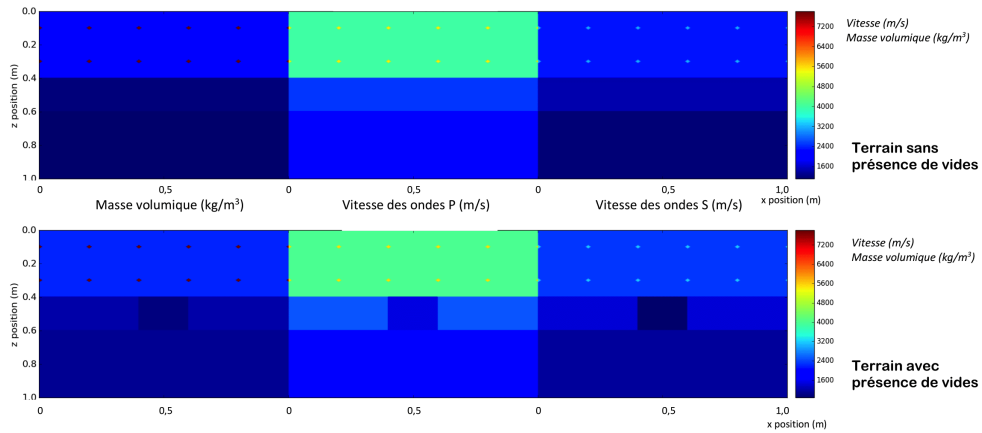


FIGURE 25 – Modèle du milieu de propagation des ondes : cas avec ferrailage

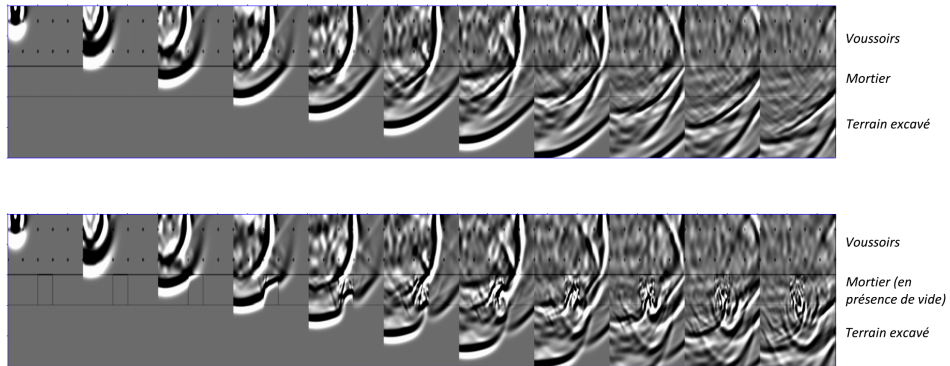


FIGURE 26 – Propagation des ondes : cas avec ferrailage

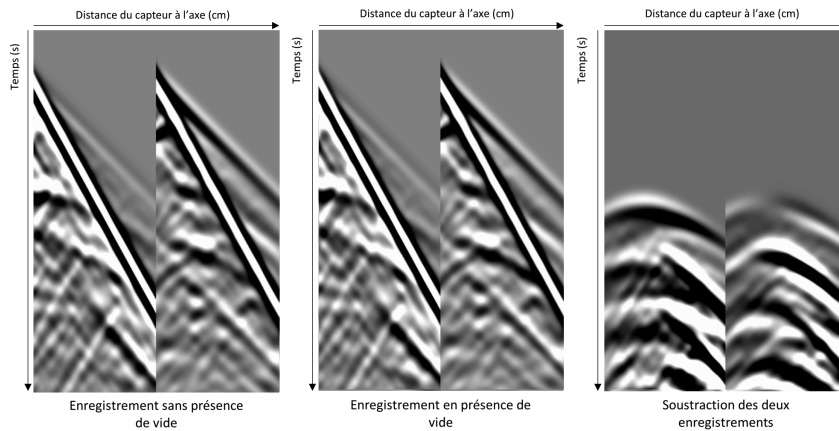


FIGURE 27 – Enregistrements des capteurs : cas avec ferrailage

3.5 Simulations : cas de décalage entre les configurations A et B [5]

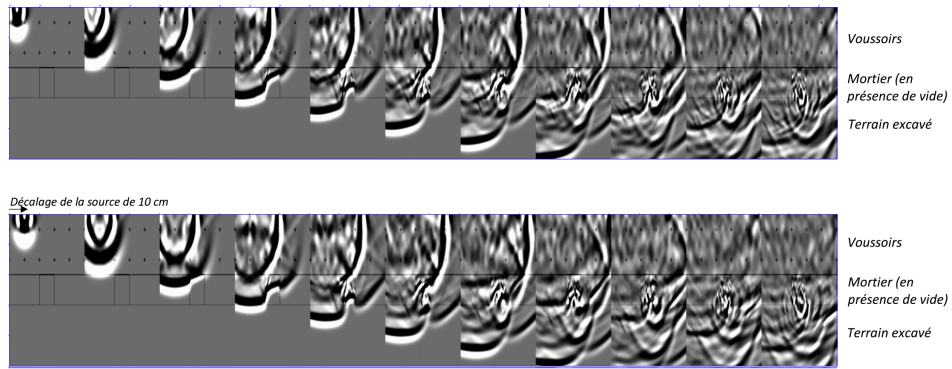


FIGURE 28 – Propagation des ondes avec un décalage de 10 cm

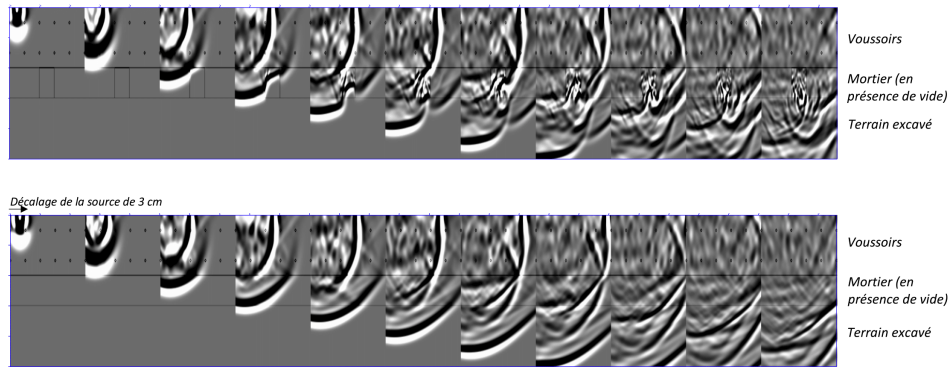


FIGURE 29 – Propagation des ondes avec un décalage de 3 cm

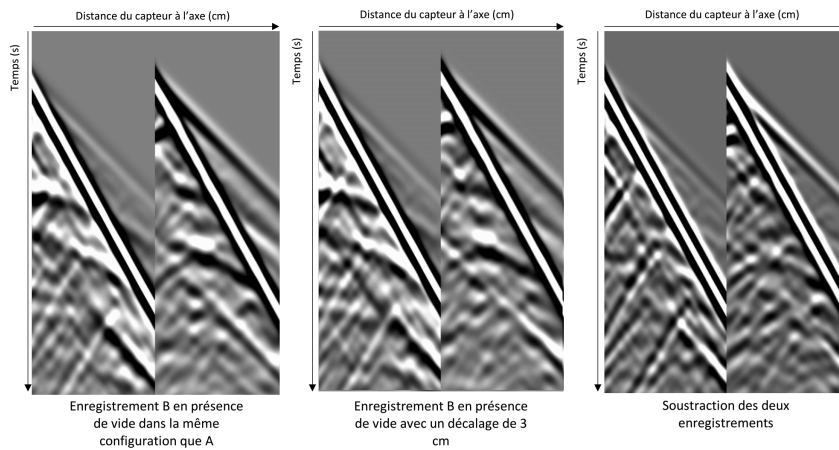


FIGURE 30 – Enregistrement des capteurs avec un décalge de 3cm

4 Le chantier du Grand Paris et l'environnement

4.1 Palissades sur le chantier de la gare Chevilly Trois Communes (ligne 14 sud) [1]



FIGURE 31 – Présence de hautes palissades sur le site de la gare de la ligne 14 sud Chevilly Trois Communes

4.2 Consommation d'eau sur le T2A [2]

	30/01	20/03	03/04	24/04	17/05	19/06	12/07	16/08	14/09
Vert des maisons	/	9107m ³	1889m ³	2464m ³	2292m ³	5493m ³	3264m ³	3305m ³	4701m ³
Friche Arrighi	/	4062m ³	265m ³	168m ³	185m ³	701m ³	827m ³	1745m ³	250m ³
Cumulé T2A	/	20494m ³	6230m ³	4843m ³	34444m ³	18641m ³	15119m ³	17677m ³	19218m ³

TABLE 1 – Relevé de la consommation d'eau potable sur des chantiers du T2A *Source : Horizon*

Le cumulé T2A comporte correspond à la somme de la consommation d'eau de 11 sites dont font partie le chantier de la gare de Vert des maisons (VDM) (Maison Alfort - Alfortville) et la friche Arrighi (Friche ARR).

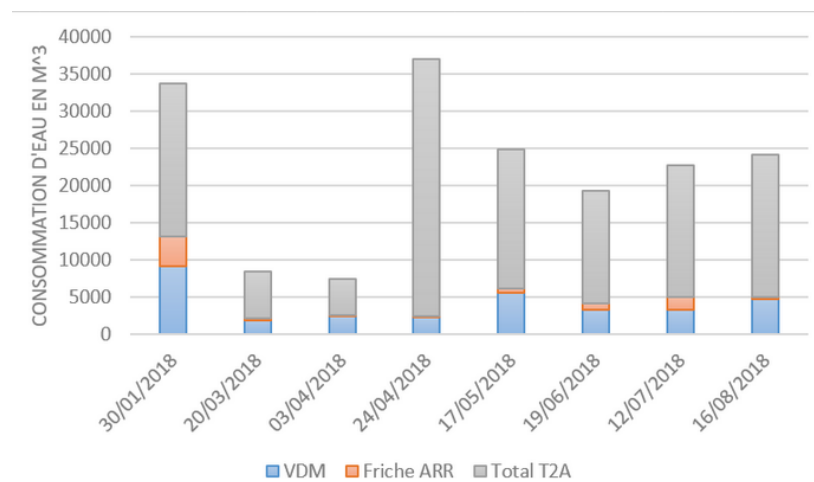


FIGURE 32 – Consommation en eau des chantiers VDM et friche Arrighi

5 Gestion des Déblais

5.1 Classification des déchets [1]

Paramètres	Seuils de l'annexe II de l'AM du 12/12/2014 (en mg/kg MS)	Adaptations « K3+ » envisagées (mg/kg MS)
As	0,5	1,5
Ba	20	60
Cd	0,04	0,12
Cr total	0,5	1,5
Cu	2	6
Hg	0,01	0,03
Mo	0,5	1,5
Ni	0,4	1,2
Pb	0,5	1,5
Sb	0,06	0,18
Se	0,1	0,3
Zn	4	12
Chlorures (1)	800	2400
Fluorure	10	30
Sulfates (1)	1000 (2)	3000
Indices phénols	1	3
COT (3)	500	500
Fraction soluble (1)	4 000	12000

FIGURE 33 – Teneurs maximales autorisées pour les classes K3 et K3+

6 Bilan Carbone et évaluation

6.1 Méthode utilisée pour réaliser le bilan carbone et détails des calculs

Pour réaliser le bilan carbone du T2A, nous avons commencé par lister toutes les sources d'émissions de dioxyde de carbone sur le chantier et dans les activités qui y sont liées (fabrication et transports).

La base carbone de l'ADEME (Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie) nous a fourni des quantités de CO₂ unitaire pour :

- 1 tonne d'acier : 938 kg
- 1 m³ de béton : 230 kg
- 1 heure de fonctionnement d'une machine de 1ch : 0,1 kg
- 1 heure de fonctionnement de machine de creusement (pelle, grue) : 6 kg
- 1 MWh d'électricité : 6 kg
- 1 kg de fioul maritime consommé : 3,64 kg
- 1 tonne déplacée sur 1km par voie fluviale : 0,03 kg
- 1 tonne déplacée sur 1km par camions : 0,12 kg

Puis en discutant nous avons chiffré la quantité de béton nécessaire, la quantité d'acier, la consommation totale d'électricité, le nombre d'heures de fonctionnement des trains sur pneus et des machines de creusement, ainsi que le nombre de tonnes à transporter et les distances sur lesquelles les transporter :

- Train sur pneus : on intègre la distance du tunnel en fonction du nombre d'anneaux. On obtient la distance totale parcourue par les TSP (7560 km), que l'on divise par la vitesse attendue de 12km/h (donnée constructeur). La puissance du TSP est de 800ch. On prend également la fabrication du TSP en compte, que l'on a compté comme 25 tonnes d'acier pour chacun des 3 TSP.
- Machine de creusement : On a 15 mois de terrassement prévus dans le planning chemin de fer fourni par Horizon. En considérant qu'il y a 15 heures de terrassement par jour, 22 jours travaillés par mois, et entre 3 et 4 machines de creusement en fonctionnement. Pour la fabrication de toutes les machines, on prend 30 tonnes d'acier
- Pour le béton des parois moulées, des dalles et casiers, et du radier, les dimensions ont été fournies par le groupement Horizon, permettant de calculer le volume de béton nécessaire ?
- La consommation d'électricité a été prise à la puissance maximale installée sur la friche Arrighi, lieu de lancement de 2 des 3 tunneliers, soit 16MW, en continu pendant 19 mois (durée de creusement). La puissance instantanée ne sera jamais la puissance maximale, mais cela compense la consommation du 3e tunnelier, ainsi que du reste des autres équipements.
- Pour l'acier de ferrailage, les taux de ferrailage ont été donnés en même temps que les dimensions pour les parois moulées.
- Les quantités de CO₂ pour les voussoirs et les bi-composants ont été calculées à partir des données sur les voussoirs d'une part et du diamètre extérieur du tunnel par rapport au diamètre foré d'autre part.
- Le tunnelier a été considéré comme étant fait intégralement d'acier, et ayant une masse totale de 4500 tonnes (données Herrenknecht).
- La masse totale de la station de traitement des boues étant inconnue du groupement Horizon, on a considéré la surface au sol (1400 m²) et la hauteur de la station (6m). Ayant ainsi le volume, on a supposé un pourcentage d'occupation de cet espace de 15%. On obtient ainsi le volume puis la masse d'acier.
- Pour les transports, les lieux d'origine et les modes de transports ont été donnés par le groupement Horizon. Les émissions pour le transport maritime des cloches en acier depuis la Chine ont été estimées en calculant la masse de carburant utilisée pour un voyage d'un porte-conteneurs à partir de la distance, de la vitesse, de la puissance des moteurs et de l'énergie massique du fioul maritime. On a ensuite divisé ces émissions totales par le nombre de conteneurs embarqués. On a estimé qu'il fallait 17 conteneurs pour transporter les cloches, chaque cloche pesant 200 tonnes et faisant environ 10m de diamètre.
- On a choisi de négliger le transport du bi-composant, car les volumes sont 10 fois inférieur aux volumes de béton, ainsi que le transport des conduites. Leur impact sur le bilan final serait négligeable.

On a donc abouti au tableau suivant, dont l'analyse nous a conduit à présenter le graphique camembert présent dans le corps principal du rapport.

Poste	Intitulé	CO ₂ (t)
Chantier	Trains sur pneus	125
	Machines de creusement	125
	Bétons parois moulées	34 000
	Bétons dalles et casiers	26 600
	Béton radier	15 400
	Électricité	1 300
Fabrication	Acier ferrailage	9 400
	Voussoirs	31 900
	Bi-composant	11 300
	Tunnelier	12 700
	Station de Traitement des Boues	9 100
Transports	Station de Traitement des Boues	800
	Voussoirs	4 700
	Bi-composant	négligeable
	Conduites	négligeable
	Tunnelier	1 500
	Déblais	24 800
	Acier	18 200
Béton	1 800	

Bibliographie

- *Evaluation of grout behind the lining of shield tunnels using ground-penetrating radar in the Shanghai Metro Line, China*, Xiongyao Xie, Yujian Liu, Hongwei Huang, publié le 31 août 2007 dans *Journal of Geophysics and Engineering*
- *Rapid and economical evaluation of concrete tunnel linings with impulse response and impulse radar non-destructive methods*, Allen G. Davis, Malcom K. Lim, Claus Germann Petersen, thèse du 2 Décembre 2003
- *Inversion non linéaire des données de prospection pétrolière*, Noble, M., 1992, PhD Thesis, Université Paris 7.
- *Loi n° 2006-1772 du 30 décembre 2006 sur l'eau et les milieux aquatiques [En ligne]*. Journal Officiel no 0303 du 31 décembre 2006. Disponible sur : <https://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?cid-Texte=JORFTEXT000000649171> Consulté le 28/11/18.
- European Chemical Agency (ECHA) . Directive européenne REACH [En ligne]. (2006, mise à jour 2018). Disponible sur : <https://echa.europa.eu/fr/regulations/reach/understanding-reach> Consulté le 28/11/18.
- Société du Grand Paris (SGP) . Environnement [En ligne]. (mise à jour 06.09.2018). Disponible sur : <https://www.societedugrandparis.fr/info/environnement-199> Consulté le 27/11/18.
- Code de l'environnement. *Classification des déchets [En ligne]*. Assemblée des Chambres Françaises de Commerce et d'Industrie, 17 Novembre 2011. Disponible sur : https://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/nomenclature_dechets.pdf Consulté le 20/11/18.
- Base Carbone de l'ADEME. [En ligne]. Disponible sur : http://www.bilans-ges.ademe.fr/documentation/UPLOAD_DOC_FR/ Consulté le 27/11/18.
- EDGAR. Emissions de CO₂ par habitant dans le monde [En ligne]. Disponible sur : <http://edgar.jrc.ec.europa.eu/overview.php?v=CO2andGHG1970-2016dst=CO2pc> Consulté le 30/11/18.