



ÉTUDES PRÉALABLES D'AMENAGEMENT DE LA GALERIE DE SÉCURITÉ DU TUNNEL DU FRÉJUS - MODANE (SAVOIE)

Jean-Félix Hubert

► To cite this version:

Jean-Félix Hubert. ÉTUDES PRÉALABLES D'AMENAGEMENT DE LA GALERIE DE SÉCURITÉ DU TUNNEL DU FRÉJUS - MODANE (SAVOIE). 2009. hal-00589780

HAL Id: hal-00589780

<https://minesparis-psl.hal.science/hal-00589780>

Submitted on 2 May 2011

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

RAPPORT D'OPTION

**ÉTUDES PREALABLES D'AMENAGEMENT DE LA GALERIE DE
SECURITE DU TUNNEL DU FREJUS
*MODANE (SAVOIE)***

Jean-Felix HUBERT



Rapport d'option

Études préalables d'aménagement de la galerie de sécurité du tunnel du Fréjus

Modane (Savoie)

Jean-Félix HUBERT

Résumé

Après l'accident ayant eu lieu en 1999 dans le tunnel du Mont Blanc, les normes de sécurité pour les tunnels routiers ont évolué. Le tunnel routier du Fréjus ayant été mis en service en 1980, il est devenu nécessaire de le mettre aux normes en le dotant d'une galerie de sécurité.

Ce travail a été réalisé au sein de l'entreprise Razel, membre du groupement titulaire du marché. Son objectif est de contribuer à la détermination de certains éléments d'aménagement et d'équipement de la galerie de sécurité, aussi bien pour son état définitif que pour la phase d'excavation. Les études menées au cours de la phase préparatoire du chantier sont en effet diverses. Il s'agit d'abord de préciser le détail de l'aménagement de la partie du tunnel excavée à l'explosif au cours des premiers mois. Il s'agit également de prévoir le principe de ce qui sera réalisé lors de l'excavation au tunnelier qui commence plusieurs mois plus tard.

Ce travail porte ainsi, dans un premier temps, sur le marché des réseaux humides parcourant l'ensemble de la galerie. Il présente ensuite l'étude d'une variante de l'aménagement du radier dans le tronçon excavé au tunnelier. Il s'achève enfin par la détermination de la méthode et de l'équipement utilisés pour le suivi de la concentration en poussières et en gaz au cours de l'excavation avec une méthode traditionnelle.

Introduction : la galerie de sécurité du tunnel du Fréjus

La Maurienne : un axe de circulation transalpin

La vallée de la Maurienne, orientée Est-Ouest, est depuis l'antiquité un axe de traversée des Alpes. On y trouve plusieurs cols permettant le passage vers d'autres grandes vallées alpines ainsi que vers l'Italie. De nos jours, cependant, les principaux flux de personnes et de marchandises empruntant cet axe traversent la frontière au travers de deux tunnels.

Le premier est le tunnel ferroviaire du Mont-Cenis. Creusé entre 1857 et 1871, il relie Modane (France) à Bardonnèche (Italie). Il permet la continuité de la ligne ferroviaire entre la France et l'Italie. Il est emprunté aussi bien pour le transport de personnes que pour le fret. Le ferroutage reste cependant limité dans le tunnel car son gabarit est insuffisant. Le trafic routier entre la France et l'Italie reste donc imposant.

Ce trafic routier emprunte un second tunnel, le tunnel autoroutier du Fréjus. Son percement a commencé en 1974 et sa mise en service date de 1980. Il est exploité conjointement par la SFTRF (Société française du tunnel routier du Fréjus) et la SITAF (son équivalent en Italie). Il comporte un tube unique bidirectionnel de 12,9 km et deux voies de circulation. Il a été relié au réseau autoroutier en 2000, renforçant son importance pour la liaison routière entre la France et l'Italie.

Les conséquences de l'accident du tunnel du Mont-Blanc en 1999

Une croissance durable du trafic dans le tunnel du Fréjus

Outre le développement prévu des infrastructures de la vallée, le tunnel du Fréjus a vu son importance renforcée par un accident dans le tunnel du Mont-Blanc en 1999. Cet autre tunnel routier reliant la France à l'Italie a ainsi été endommagé et fermé de 1999 à 2002 pour y effectuer des travaux de réfection et de mise en sécurité. Le trafic routier entre la France et l'Italie s'est donc majoritairement reporté sur le tunnel du Fréjus, confirmant son importance. Cette importance ne s'est jamais démentie, même après la réouverture du tunnel du Mont-Blanc. En 2008, longtemps après la fin de cette situation exceptionnelle, le trafic journalier moyen dans le tunnel du Fréjus a en effet atteint 2300 véhicules lourds et 2400 véhicules légers.

Une évolution des normes de sécurité

Suite à l'accident du tunnel du Mont-Blanc, les normes de sécurité concernant les tunnels ont été renforcées. Il deviendra impératif en 2014 de disposer d'une issue de secours tous les 500 m dans les tunnels routiers (directive européenne du 29 avril 2004). Or le tunnel du Fréjus ne respecte pas cette directive. Il n'était pas possible de ménager ces issues de secours dans le tube existant, et la couverture rocheuse empêche toute sortie vers l'extérieur. C'est pourquoi le percement d'une galerie de sécurité a été décidé en 2007 : il s'agit de réaliser une galerie parallèle au tracé du tunnel et reliée à ce dernier par un nombre de rameaux suffisant pour assurer le respect de la directive de 2004.

Le projet de galerie de sécurité

Le chantier de génie civil est divisé en deux lots, l'un en France et l'autre en Italie. C'est la SFTRF qui est maître d'ouvrage pour le premier lot, et le groupement Razel-Bilfinger Berger a remporté le marché. Celui-ci est d'un montant de 130 M€ et a une durée contractuelle de 1300 jours.

Il s'agit de la réalisation d'une galerie (ouvrages de tête et partie courante) parallèle au tracé du tunnel routier à une distance entre axes d'environ 50 m. La longueur totale de l'ouvrage est de 12875 m, dont 6495 dans le lot français, avec un diamètre utile de 8,00 m qui dégage un gabarit de 4,00x6,60 m. On représente ci-dessous la vue en plan (figure 1).

La galerie est reliée au tunnel par des rameaux de nature variée :

- 34 abris (18 côté France) espacés de 367 m, ventilés et pressurisés, permettant le refuge des usagers en cas d'incendie dans le tunnel routier et l'évacuation des usagers vers la galerie. L'un de ces rameaux est relié au laboratoire souterrain de Modane.
- 5 by-pass (2 côté France) permettant le transit de véhicules de secours entre tunnel et galerie.
- 8 stations techniques souterraines (4 côté France) abritant les installations de contrôles électriques.
- 2 centrales de ventilation (1 côté France) raccordées aux deux centrales existantes, qui assurent la ventilation des nouveaux ouvrages.

Le percement du tunnel demande par ailleurs un certain nombre de travaux préparatoires à l'air libre afin de mettre en place une tranchée couverte, un fonçage sous autoroute, une paroi clouée, le remblai d'accès et la zone de stockage des déblais.



Figure 1 : vue en plan du tunnel du Fréjus et de sa galerie de sécurité

Côté français : méthodes

Plusieurs phases

Désormais nous considérerons seulement le premier lot, côté Français, et donc le chantier effectué par l'entreprise Razel. La longueur de galerie à excaver est donc de 6495 m. Pour cela la méthode retenue est de commencer l'excavation grâce à une méthode traditionnelle (brise-roche hydraulique puis explosif) et de poursuivre ensuite avec un tunnelier jusqu'à la chambre de démontage située à proximité de la frontière et dont l'excavation est incluse dans le deuxième lot.

Ces trois méthodes de creusement permettent de s'adapter à deux impératifs. Le premier impératif est le délai de fabrication et de livraison du tunnelier. Le tunnelier a été commandé en septembre 2009, et il faut environ 11 mois pour le mettre en service à partir de cette date. Afin de ne pas faire attendre le chantier, le creusement débute avec d'autres moyens. Le second impératif est d'ordre géologique : les roches traversées sont d'abord des gypses et anhydrites, puis des cargneules et enfin des roches plus dures telles que des schistes. Il est hors de question d'utiliser des explosifs dans les roches tendres ou altérées que sont les gypses, anhydrites et cargneules, ce qui amène à commencer l'excavation avec des brises-roches hydrauliques.

Dans les deux tronçons on conserve une distance entre axes de 50 m avec le tunnel routier, une pente de 0,53 % montante dans le sens France-Italie et un gabarit de passage de 6,60x4,00 m sur chaussée définitive. Cependant les sections ne sont pas identiques.

Premier tronçon

L'excavation commence après la fin des travaux préparatoires à l'air libre, en novembre 2009. Les premiers mètres sont excavés au brise-roche hydraulique, et une voûte parapluie est mise en place pour soutenir les abords du tympan. Ensuite commence l'excavation à l'explosif jusqu'au km 0,950.

La section est en fer à cheval (figure 2) avec un rayon intrados en voûte (120°) de 4,00 m et un rayon intrados sur piédroit (37°) de 6,90 m. La hauteur de la voûte est de 6 m au dessus de la chaussée définitive.

Le soutènement est réalisé à l'aide de cintres et de béton projeté.

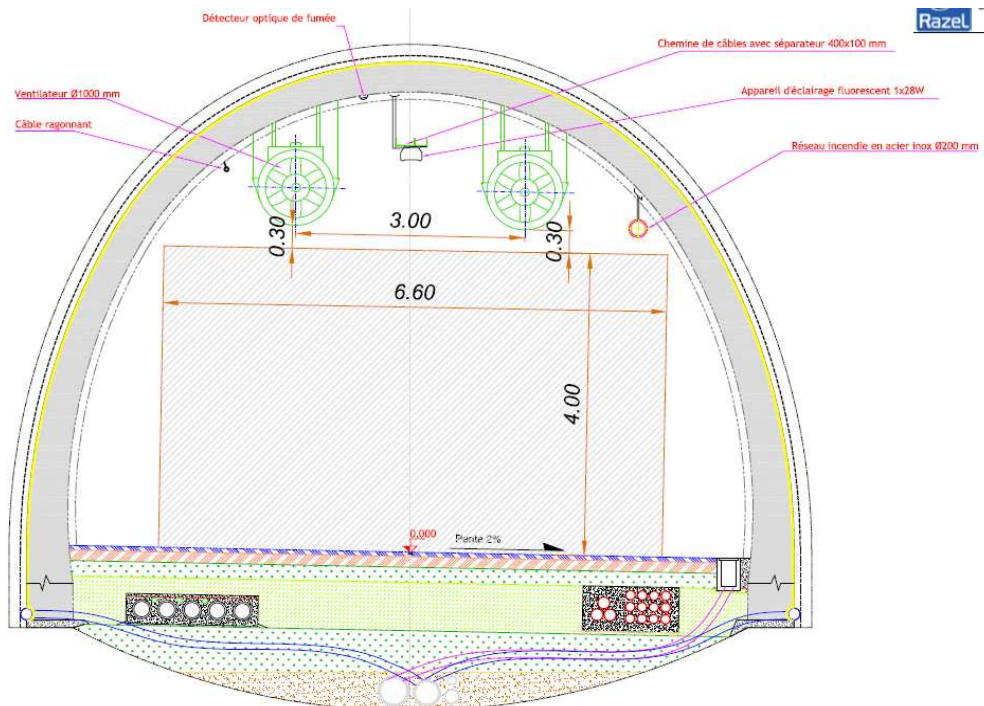


Figure 2 : coupe du tronçon excavé avec une méthode traditionnelle

Deuxième tronçon

Une fois la fabrication du tunnelier achevée (date prévue : août 2010) on réalise une chambre de montage, et il est alors monté dans cette chambre. Commence alors la phase d'excavation au tunnelier, qui dure jusqu'à l'arrivée dans la chambre de démontage (16 mois plus tard, soit décembre 2011).

Le rayon utile est de 4,00 m avec une hauteur en voûte de 6,10 m au dessus de la chaussée définitive. La coupe est représentée en figure 3.

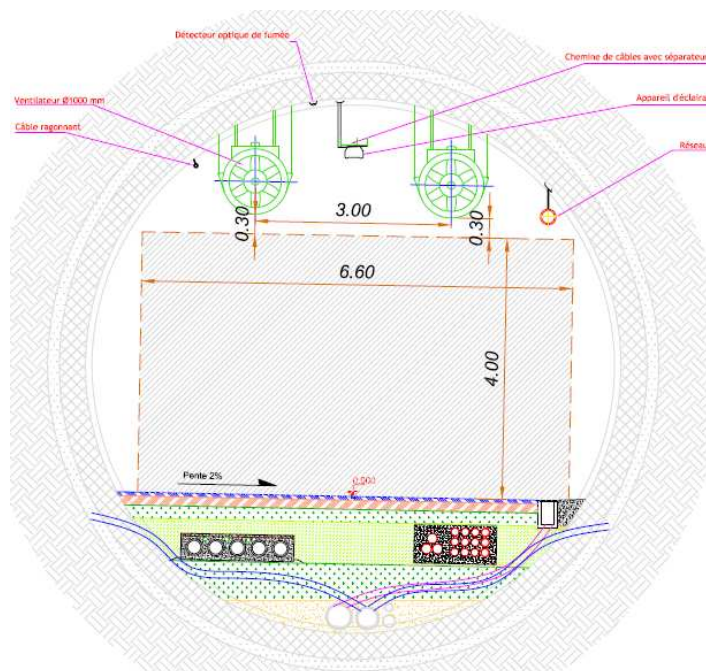


Figure 3 : coupe du tronçon excavé au tunnelier

Le tunnelier choisi est un tunnelier pour roche dure à simple jupe, ce qui signifie que l'excavation et la pose des voussoirs ne sont pas simultanées. Entre la paroi et les voussoirs, il est prévu d'injecter de la grave à laquelle on ajoute des billes d'argile compressibles.

Rameaux

Les rameaux sont excavés à l'explosif, après avoir découpé les voussoirs. Il faut toutefois éviter les interactions avec les ouvrages existants. Ceci impose de ne pas utiliser l'explosif lorsqu'on s'en rapproche, afin de limiter les vibrations. C'est pourquoi une autre méthode sera utilisée pour déboucher dans le tunnel routier.

Le marché impose que les abris soient mis à disposition des usagers du tunnel routier au fur et à mesure de l'avancement des travaux. Il faut ainsi qu'il n'y ait pas plus de 1000 m entre le front de taille et le dernier abri disponible, équipé « en provisoire. »

Déblais

Pendant la phase d'excavation traditionnelle, l'évacuation des déblais se fait par transport routier jusqu'à une zone de stockage provisoire.

Pendant la phase d'excavation au tunnelier, les déblais sont acheminés par un convoyeur à bande jusqu'à une zone de tri et de valorisation, avant d'être à nouveau acheminés par bande transporteuse jusqu'à la zone de stockage.

Équipements

En plus de l'excavation et du soutènement de la galerie, le marché comprend aussi une partie de l'équipement, tels que la mise en place de la chaussée et du système d'évacuation des eaux usées et des eaux de drainage. Le marché prévoit également la préparation de l'installation des réseaux électriques et de télécommunication. On peut en particulier noter la présence de câbles très-haute tension, destinés à assurer une meilleure interconnexion entre les réseaux français et italien, ainsi que le passage d'une fibre optique. Ces réseaux représentent l'un des intérêts majeurs de cette galerie.

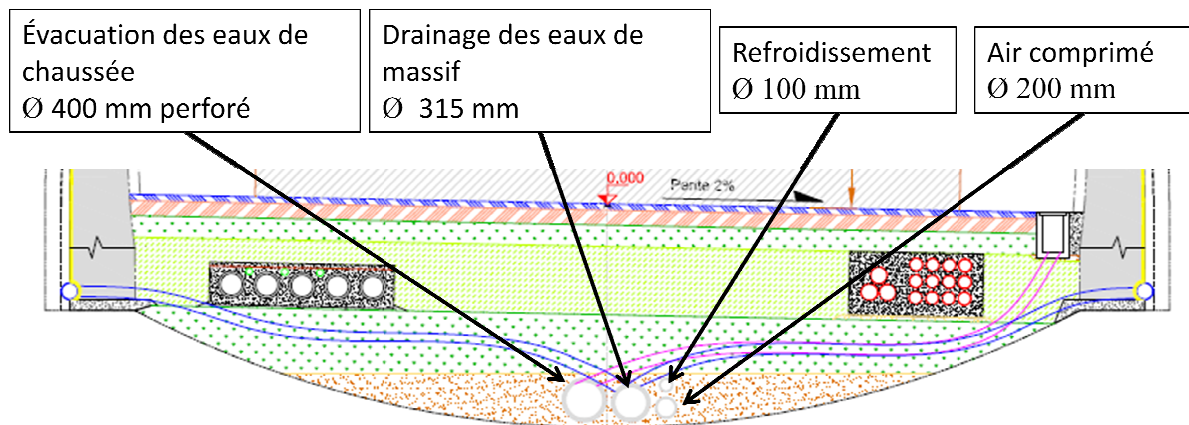
Objectifs du présent travail

Ce rapport présente le travail effectué au cours d'un stage réalisé d'août à décembre 2009, lors du démarrage du chantier. Le but de ce stage était de découvrir d'une part les études préalables au chantier, anticipant la réalisation d'une partie de l'ouvrage, et d'autre part de participer au suivi du chantier. Ce rapport présente ainsi en premier lieu une étude préalable des réseaux d'adduction et d'évacuation d'eau en radier. Cette étude d'un aspect technique particulier permet de comprendre la complexité de l'étude d'un projet plus vaste, tel que celui présenté par la suite : celle d'une variante d'aménagement du radier et de la chaussée. Ce rapport s'achève enfin par un sujet ayant trait au suivi du chantier : la détection de la concentration en gaz et en poussières.

1 Réseaux humides

1.1 Réseaux concernés

La présente étude porte sur 4 tubes situés au fil d'eau du radier, et en priorité dans le tronçon excavé avec une méthode traditionnelle. Ces réseaux sont indiqués en figure 4.



Les indications données par le marché sont sommaires. Elles indiquent que tous ces tubes doivent être réalisés en polyéthylène haute-densité (noté PEHD) avec une pression nominale de 6 bar (10 bar pour le tube de diamètre 200 mm). L'espacement entre d'éventuels piquages est également précisé, ainsi que la nature des drains qui s'y raccordent. Les tubes de diamètre 125 mm et 200 mm doivent être étanches, alors que le tube de diamètre 400 mm doit être perforé.

À partir de ces indications et de quelques plans (comme à la figure 4) il faut déterminer les tubes à commander et la manière de les mettre en œuvre. Il faut cependant savoir que les préconisations du marché ne sont pas toutes fermes et définitives, et qu'il est donc possible de faire valider une solution technique qui s'en écarte par le maître d'œuvre.

1.2 Réseaux d'adduction

Il s'agit des tubes de diamètre 125 mm et 200 mm. Il n'y a que très peu de piquages sur ceux-ci (uniquement au niveau des rameaux) et les principales questions techniques portent sur le raccord entre les barres (dont la longueur a été fixée à 6 m) et le phasage de leur mise en œuvre.

1.2.1 Raccords

Il s'agit de tubes lisses, et on dispose de deux manières d'assembler les barres entre elles.

La première méthode est celle dite de la « polyfusion » (figure 5) pour laquelle on utilise une machine peu aisément déplaçable. Il s'agit d'approcher l'extrémité des deux tubes à raccorder d'une plaque en téflon à haute température. Celle-ci provoque la fusion des extrémités, on peut alors retirer la plaque en téflon et raccorder les deux barres en exerçant une pression. Après un temps de refroidissement, les deux barres sont soudées. Cette technique nécessite un équipement relativement lourd, et il faut tirer des longueurs de tuyaux importantes entre chaque soudure, car la machine n'est pas déplaçable. Son avantage principal est de ne pas utiliser d'élément consommable.



Figure 5 : appareil de polyfusion

La deuxième méthode proposée consiste en effet à utiliser un manchon électro soudable (figure 6) entre chaque barre. On enfile l'extrémité de chacun des deux tubes dans le manchon, on branche le manchon à deux électrodes, et la circulation du courant électrique dans une résistance fait partiellement fondre le polyéthylène et assure ainsi la soudure. L'avantage de cette méthode est sa grande simplicité de mise en œuvre. Aussi est-ce celle-ci qui a été retenue.



Figure 6 : manchon électro soudable

1.2.2 Phasage

Lors de la phase de chantier, il n'y a qu'une chaussée provisoire réalisée en remblai activé par du ciment. Il convient donc de creuser une tranchée dans ce remblai, au milieu du tunnel. On y place un lit de pose en sable, avant d'y poser les tubes, qui seront assemblés en fond de tranchée. On peut alors combler la tranchée.

1.3 Réseaux d'évacuation

Il s'agit ici des tubes de diamètre 315 mm et 400 mm. Le tube de 400 mm est destiné à l'évacuation des eaux de chaussée (aussi bien celles qui ruissellent sur la chaussée vers le caniveau que celles qui s'infiltrent dans le remblai). Il doit être perforé, ce qui écarte toute possibilité d'utiliser du PVC, qui aurait pourtant présenté des avantages pour la réalisation des piquages. Comme il s'agit d'un drain, l'étanchéité des raccords n'est pas nécessaire, et on peut se contenter d'un simple emboîtement.

Le tube de diamètre 315 mm est destiné à l'évacuation des eaux de massif. Il s'agit de l'eau qui parvient à l'extérieur de la membrane d'étanchéité et qui est récupérée par un drain placé régulièrement en base de piédroit. Pour assurer l'étanchéité et éviter la pollution par des eaux usées, le raccord se fait avec un joint en caoutchouc.

Ces deux tubes sont choisis en PEHD, lisses à l'intérieur et annelés à l'extérieur. Les tubes annelés sont en effet plus résistants à l'écrasement et à l'ovalisation.

1.3.1 Piquages

Le cahier des clauses techniques particulières (CCTP) indique le départ de drains de diamètre 110 mm tous les 25 m pour les eaux de chaussée et tous les 32 m pour les eaux de massif. Pour un grand nombre de piquages, la solution la plus simple et la moins coûteuse est la suivante : découpage d'un orifice dans le tube à l'aide d'une scie-cloche puis pose d'un raccord avec joint (figure 7).



Figure 7 : piquage sur tube annelé

Cependant de nombreux problèmes se posent alors. Tout d'abord, il faut remarquer que les drains ont une flexibilité limitée et que les tubes sont très proches les uns des autres. Ceci oblige à faire passer les drains très près de la surface de la chaussée en remblai. Or des engins très lourds vont circuler sur cette chaussée, ce qui risque de provoquer l'écrasement de ces drains. Il semble difficile, d'après les documents du CCTP, de faire passer le drain à plus de 15 cm de la surface. Il semble donc qu'il faille trouver une autre méthode.

1.3.2 Adaptation de la méthode

Il est tout d'abord possible d'augmenter l'épaisseur de remblai pour réaliser la chaussée provisoire. Ceci pose un problème de coût de matière première et de coût mise en œuvre. En outre, il sera nécessaire de revenir au niveau prévu initialement avant de mettre en place les réseaux suivants et la chaussée définitive. Le coût d'une telle adaptation de méthode pourrait donc s'avérer élevé.

Il est également possible de changer légèrement l'emplacement des tubes, mais la largeur de la tranchée est limitée par le passage d'engins. Cela ne peut donc pas être une solution complète.

On pourrait enfin étudier d'autres systèmes de raccord pour les drains, tels que des Y, qui permettraient de gagner quelques centimètres, sans pour autant que cela apporte une solution indépendante.

1.4 Conclusion

Cette étude montre à quel point une étude qui n'a pas été menée scrupuleusement à son terme peut amener à reconsidérer les méthodes et ainsi induire des coûts supplémentaires notables. Dans ce cas précis, au moment où est écrit le présent rapport, la solution à mettre en œuvre n'a pas encore été déterminée.

2 Étude de l'aménagement du radier

On s'intéresse à une variante d'aménagement du radier dans le tronçon du tunnel excavé au tunnelier. Il s'agirait pour l'essentiel de remplacer la chaussée prévue au marché, reposant sur une couche de remblai par une chaussée réalisée grâce à des éléments préfabriqués en béton armé.

L'intérêt de proposer cette variante est de diminuer le coût global de l'aménagement du radier tout en lui faisant remplir les mêmes fonctions : permettre dans un premier temps la circulation des engins de chantier, et ensuite l'exploitation de la galerie (réseaux et chaussée.) La diminution des coûts éventuelle serait liée à une simplification de la mise en place de la chaussée, puisque l'on supprimerait le besoin d'une chaussée provisoire qu'il faudrait entretenir puis remettre à niveau avant de mettre en place la chaussée définitive.

2.1 Étude de la proposition initiale d'aménagement du radier

La proposition initiale d'aménagement du radier consiste en effet à réaliser la chaussée en deux phases. La première, provisoire, permet l'installation des premiers réseaux et la circulation nécessaire au chantier. Il s'agit alors de mettre en place une couche de remblai activé recouvrant quelques canalisations. La seconde phase consiste à mettre en place la chaussée définitive et l'ensemble des réseaux enfouis dans le remblai.

2.1.1 Niveau

Le niveau de base au cours de la phase provisoire est celui qui correspond au dessous des multitubulaires qui seront posées avant de réaliser la chaussée définitive (figure 8).

Il est cependant nécessaire de pouvoir accéder aux rameaux au cours du chantier. Il faut donc remblayer, de telle sorte qu'en face des rameaux le niveau provisoire de la chaussée atteigne le niveau définitif de ces rameaux. La transition entre ces deux niveaux s'effectue au moyen de rampes d'accès dont la pente est limitée à 4% afin de permettre la circulation de tous les engins de chantier.

Avant de mettre en place la chaussée définitive, il est nécessaire de détruire les rampes pour installer les réseaux situés entre les deux niveaux de remblai. Une fois les réseaux installés, on peut achever le remblayage.

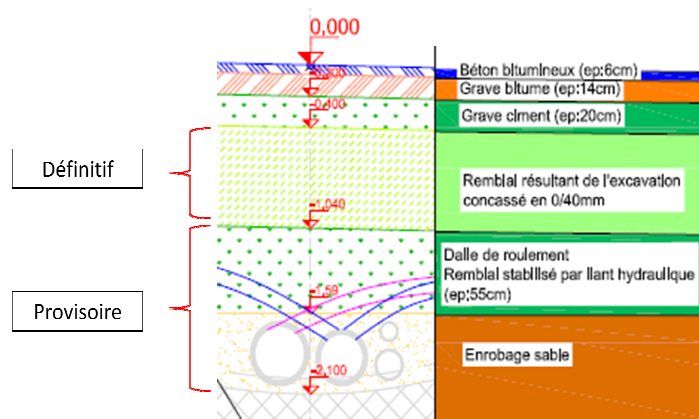


Figure 8 : chaussée

2.1.2 Remblai

2.1.2.1 Niveau provisoire

Le déblai concassé et criblé est stocké dans une zone de stockage provisoire. À partir de cette zone, le déblai est chargé dans des tombereaux jusqu'à proximité d'une centrale à béton située à l'intérieur du tunnel. Une chargeuse approvisionne alors la centrale en déblais. Par ailleurs la centrale est approvisionnée en ciment, ce qui permet d'activer le remblai avec 4% en masse de ciment.

À la sortie du malaxeur, le remblai activé est récupéré par des camions qui vont le transporter jusqu'à hauteur du chantier de remblayage. Une pelle et un compacteur servent à mettre en place ce remblai activé.

2.1.2.2 Cadences pour l'activation du remblai

La centrale à béton produit au maximum 16 m^3 de remblai activé par heure. On effectue les calculs en prenant en compte la compaction de ce remblai (coefficient égal à 1,6 soit $10 \text{ m}^3/\text{h}$ de remblai activé compacté.)

Cette production maximale tout au long des postes au cours desquels le tunnelier est à l'arrêt (1 poste par jour et le dimanche) permet tout juste, en moyenne hebdomadaire, de mettre le remblai à son niveau provisoire derrière le tunnelier lorsque celui-ci atteint sa vitesse maximale d'avancement. Une difficulté se pose donc si le tunnelier atteint cette vitesse lorsqu'il franchit l'emplacement d'un rameau : on risque de mettre trop de temps à atteindre le niveau de remblai souhaité pour permettre un avancement correct de l'excavation de ce rameau.

2.1.2.3 Niveau définitif

Pour la remise à niveau des rampes, le remblai activé superflu est détruit au BRH et chargé dans des tombereaux qui l'emportent jusqu'à la zone de stockage.

On remblaye alors jusqu'au niveau final grâce à des dumpers, pelles et compacteurs. En même temps sont mis en place les réseaux situés entre le niveau provisoire et le niveau définitif de remblai.

2.1.2.4 Chaussée

La chaussée est ensuite installée par la mise en place successive de couches de grave ciment, de grave bitume et de béton bitumineux. Dans cette chaussée sont ménagées diverses ouvertures telles que le caniveau latéral.

2.2 Étude d'une variante

2.2.1 Éléments préfabriqués

La variante repose sur la réalisation de la chaussée à l'aide d'éléments préfabriqués en béton armé. Ces éléments sont réalisés à l'aide de moules et avec du béton provenant de la centrale à béton. On peut pratiquer des réservations dans ces éléments, qui serviront à leur fixation, ou encore à la réalisation du génie civil secondaire (par exemple : ouvertures pour les chambres de tirage, ou caniveau.) Une difficulté imposée par ceci est qu'il faut repérer des éléments bien particuliers, les produire en avance et les suivre jusqu'à leur pose.

Ces éléments sont assemblés afin de former des ensembles de 1,80 m de longueur. Un ensemble comporte une cloison centrale verticale et deux dalles horizontales (figure 9) qui viennent s'appuyer chacune sur un côté du tunnel et sur la cloison centrale. On place un appui en néoprène entre chaque élément, et entre les éléments et les voussoirs. Ces appuis permettent d'assurer une meilleure adaptation aux irrégularités du tunnel (imprécision sur la pose, rayon de courbure du tracé, etc.)

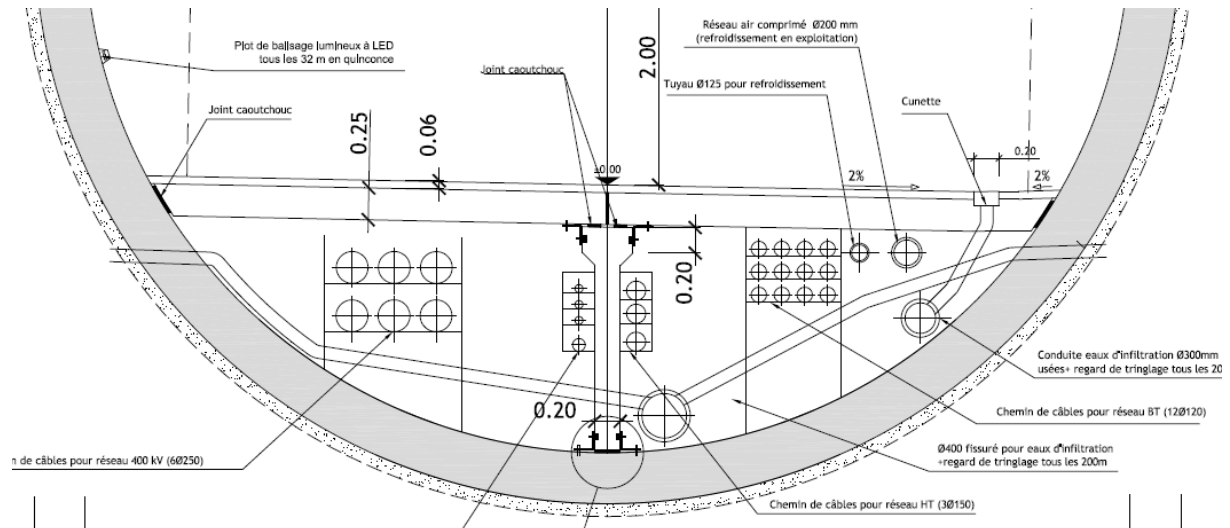


Figure 9 : coupe de la galerie avec éléments en béton

2.2.1.1 Fixation

La fixation de ces éléments sur les voussoirs se réalise à l'aide de chevilles. Après la pose de chaque élément on fore un trou dans le voussoir, et on insère la cheville. Quant à la fixation des dalles à la paroi, elle s'effectue à l'aide de douilles noyées (figure 10).

Dans les deux cas, les fixations sont dimensionnées pour permettre l'utilisation de la chaussée au cours de la phase provisoire, qui est la plus exigeante du fait de la circulation de lourds engins de chantier.

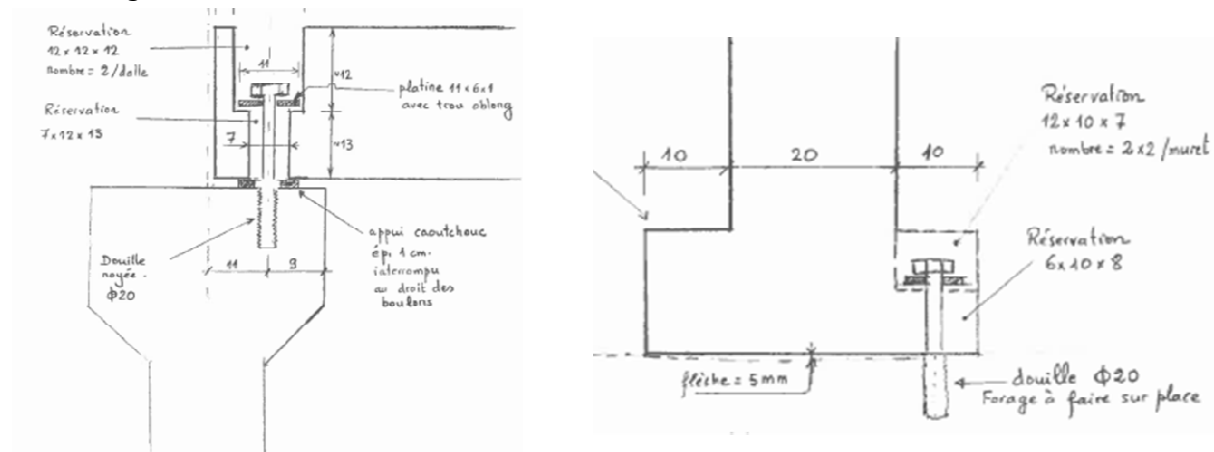


Figure 10 : fixation des éléments

2.2.2 Production et mise en place : cadences

Une fois les éléments décoffrés, il faut les stocker afin de permettre le durcissement du béton pendant une quinzaine de jours avant la pose. Le stock ainsi constitué (environ 450

éléments) peut éventuellement servir de tampon dans le cas d'un avancement plus rapide que ce que la production autorise à suivre.

Une question se pose alors : quelle doit être la cadence de production ? Les stocks ne peuvent en effet pas être trop volumineux, en raison d'un manque d'espace de stockage. Par ailleurs à la vitesse d'avancement maximale du tunnelier, s'il faut produire chaque jour le nombre d'éléments correspondant à cet avancement, le nombre de moules s'élève à 66. Le stock correspondant à 15 jours de production comporterait alors environ 1000 éléments.

Il faut donc trouver le compromis entre distance au tunnelier admissible, vitesse de pointe de production, volume de stockage et taille de l'usine de préfabrication. Notons que le marché limite la distance séparant le tunnelier et le dernier rameau aménagé, ce qui implique une limitation de la vitesse du tunnelier.

Il faut en même temps déterminer l'outil de mise en place des éléments préfabriqués. On peut prévoir un outil intégré au tunnelier, ce qui impose lors du choix précédent de ne pas dépasser une distance donnée entre le front de taille et la chaussée.

Il convient enfin de déterminer les cadences d'approvisionnement et de transport en fonction du rythme d'avancement défini précédemment. Les approvisionnements concernés sont celui en béton de l'usine de préfabrication, et celui en éléments de la zone de mise en place. Il faut entre chacun de ces lieux prévoir un outil pour le chargement, le transport et le déchargement, ainsi que la main d'œuvre associée.

2.2.3 Chaussée

Une fois les éléments préfabriqués mis en place, il reste à ajouter une couche de support (grave bitume) et la couche de roulement pour obtenir la chaussée définitive. La couche de support est coûteuse, mais il semble difficile d'étaler directement la couche de roulement sur les dalles en béton.

2.2.3.1 *Génie civil secondaire et réseaux*

Il faut pratiquer des réservations dans certains éléments afin de permettre la réalisation du génie civil secondaire. On peut évoquer par exemple une cunette pour les eaux usées, le passage de certains drains, les regards d'inspection des canalisations et les chambres de tirage. On peut s'interroger sur la possibilité de simplifier ces ouvrages par rapport à la proposition initiale d'aménagement. On pourrait par exemple supprimer les parois en béton des regards.

Les réseaux sont de différentes natures : réseaux électriques, fibres optiques pour télécommunications et réseaux humides. Les câbles électriques passent dans des fourreaux, qui sont eux-mêmes posés sur des racks. On ménage régulièrement des chambres de tirage qui permettent d'installer ces câbles dans les fourreaux.

2.2.4 Sécurité incendie et isolation

Le remplacement du remblai par un espace vide induit des difficultés supplémentaires pour la protection des installations contre l'incendie. Dans le cas d'une chaussée remblayée, le remblai joue le rôle d'isolant, et empêche la propagation des incendies entre le dessus de la chaussée et les réseaux enfouis, ou l'inverse. Un incendie qui se déclencherait sur l'un des réseaux serait en effet confiné grâce à ce remblai : il aurait du mal à se propager d'un point à un autre, et la chaussée serait isolée de la chaleur et des gaz. Dans le cas inverse, un incendie qui se déclarerait au dessus de la chaussée se propagerait mal sous le remblai (les gaz brûlants montent vers la voûte).

En l'absence de remblai, il faut s'assurer qu'un incendie qui se déclarerait ne puisse affecter que le moins possible l'usage de la galerie. Il faut garantir la sauvegarde du plus grand nombre des trois fonctions suivantes : la circulation dans la galerie, le fonctionnement des réseaux assurant la sécurité du tunnel routier, et enfin le fonctionnement des réseaux importants passant au travers de la galerie, tels que le réseau électrique très-haute tension. Or on dispose de trois compartiments séparés par les éléments en béton. Il convient donc de placer les réseaux de sécurité dans un compartiment dédié.

Cependant une telle mesure ne sera efficace que si les compartiments sont isolés les uns des autres. Il faudrait donc placer des joints étanches aux gaz et ignifugés entre les éléments préfabriqués. Le coût des joints non ignifugés représente déjà un poste de dépense significatif ; l'ignifugation de ces joints n'a pas été chiffrée, mais serait certainement une source de dépenses supplémentaires notable.

2.2.5 Déblai

Renoncer à remblayer une partie du radier amène à stocker plus de déblais dans les zones prévues à cet effet. Il faut donc prendre en compte la redevance associée.

2.2.6 Ventilation

Au cours du chantier, la circulation d'engins supplémentaires par rapport à ce qui était prévu initialement pourrait éventuellement amener à redimensionner la ventilation.

Par ailleurs cette variante permet d'utiliser l'espace situé sous la chaussée pour mettre en place la ventilation de chantier. Cet aspect est particulièrement intéressant.

Il convient enfin d'examiner si la création d'un espace sous la chaussée ne nécessite pas une ventilation spécifique définitive, demeurant après la mise en service de la galerie. Ceci serait la source de coûts d'exploitation supplémentaire, ce qui semble rédhibitoire pour ce projet.

2.3 Résultats de l'étude

L'étude porte sur l'aménagement de la chaussée prévu au marché (chaussée sur remblai) ainsi que sur la variante proposée (chaussée sur dalle béton.) Les objectifs de cette étude sont :

- d'établir la liste des étapes nécessaires pour la réalisation de la chaussée dans chacun des deux cas.
- De déterminer les quantités correspondantes.
- D'évaluer les coûts pour chacun des cas et de les comparer à ceux prévus par le marché.

Trois documents ont donc été réalisés, chacun permettant de satisfaire à l'une de ces exigences.

2.3.1 Phasage

Les étapes principales pour l'aménagement de la chaussée sur remblai et sur dalle béton figurent en annexe 1. On rencontre plusieurs difficultés et quelques paramètres imprévisibles dans l'élaboration de ce phasage.

Pour la chaussée sur remblai la vitesse d'excavation au tunnelier est un paramètre essentiel mais peu prévisible. Par ailleurs il faut distinguer deux phases : mise en place de la chaussée provisoire, au fur et à mesure de l'avancement, et mise en place de la chaussée définitive, dont la durée reste à définir.

Pour la chaussée sur dalles en béton, la vitesse d'excavation est aussi un paramètre essentiel. Il faut en outre retenir que les étapes déterminantes dépendent du matériel utilisé. Par exemple, si l'on choisit un engin de pose des éléments intégré au tunnelier, il est nécessaire de poser les éléments avec la même vitesse d'avancement que celui-ci.

2.3.2 Quantités

Un tableau présentant les quantités les plus significatives figure en annexe 2. Mais les deux propositions d'aménagement de la chaussée sont trop différentes pour que l'on puisse réellement comparer différentes quantités. Il faut ici se contenter d'observer les ordres de grandeur.

2.3.3 Coûts

Un tableau indiquant le coût figure en annexe 3. Il indique une répartition sommaire des dépenses. C'est ce tableau qui permet le mieux de comprendre quels sont les enjeux principaux en termes de coût, et ainsi de conclure à l'intérêt d'une méthode d'aménagement par rapport à une autre.

À titre indicatif, et pour mettre en valeur la méthode utilisée pour calculer ces coûts, le tableau comprend aussi les coûts prévus dans le marché. Ces coûts sont ceux qui correspondent aux prix unitaires figurant au marché.

La difficulté principale dans la lecture de ce tableau est qu'il ne fait pas figurer les incertitudes et les hypothèses sur les coûts. En effet, selon les cas, le prix unitaire ou la quantité n'est pas certaine, et une légère erreur peut avoir des conséquences notables sur le montant total. On peut ainsi évoquer le coût de main d'œuvre, ou encore le prix unitaire du remblayage (prix de la mise en œuvre de 1 m³ de remblai dans la chaussée).

2.3.3.1 Main d'œuvre

Les coûts de main d'œuvre ont été calculés comme suit. On commence par déterminer les effectifs nécessaires. Pour la fabrication des éléments en béton, on considère que le personnel travaille trente-cinq heures par semaine pendant la durée de la préfabrication. Pour tout le reste du personnel, on considère que les équipes travaillent pendant toute la durée des postes considérés. Il s'agit en l'occurrence des postes de maintenance pour la chaussée sur remblai, ou des postes d'avancement pour la chaussée sur dalles préfabriquées. On obtient ainsi un nombre total d'heures travaillées par personne. On multiplie alors ce nombre d'heures par un coût horaire de main d'œuvre, variable selon les équipes.

2.3.3.2 Prix unitaire du remblayage

Le poste de dépense correspondant au prix « Réalisation de la chaussée provisoire et remblai » est le plus élevé. Il semblait donc intéressant de vérifier l'ordre de grandeur du prix unitaire, correspondant à 1 m³ de remblai mis en œuvre pour la chaussée. On prend en compte dans ce prix le fonctionnement des machines (chargeuse, tombereau, compacteur, pelle) ainsi que le personnel nécessaire pendant tout le temps dévolu à l'excavation au tunnelier. On fait donc l'hypothèse que la chaussée définitive est réalisée dans cet intervalle de temps, ce qui est une hypothèse optimiste. On obtient pourtant un prix largement supérieur à celui qui est indiqué dans le marché (de l'ordre de 45 €/m³ au lieu de 20 €/m³). Ce dernier est en effet le résultat d'une ventilation de certains coûts (main d'œuvre et matériel) sur l'ensemble du chantier, et résulte donc d'une méthode de calcul plus compliquée et dépendante de l'ensemble du calcul des prix.

Ce rapide calcul montre à quel point les prix unitaires indiqués dans le marché correspondent à un chantier considéré dans son ensemble. Ceci implique que modifier la méthode envisagée initialement a des conséquences qui peuvent rendre caducs les calculs de prix. Il faut donc être circonspect lorsque l'on utilise les prix unitaires indiqués dans le marché pour évaluer le coût marginal d'une partie du chantier.

2.4 Conclusion

Le comparatif des coûts nous permet tout d'abord de mettre en évidence une différence de prix sensible entre la chaussée sur remblai considérée dans cette étude et ce qui est prévu dans le marché. La raison principale de cet écart est la prise en compte du prix de l'activation du remblai. Le volume de remblai à mettre en œuvre est par ailleurs légèrement supérieur dans l'étude que dans le marché en raison de la prise en compte des rampes.

Cette comparaison souffre de deux incertitudes majeures. On peut tout d'abord remarquer que les prix unitaires n'ont pas été vérifiés. Or ces prix unitaires ne donnent pas forcément le coût réel ni le coût marginal. Ainsi, le calcul du coût de l'activation du remblai a été effectué avec une méthode indépendante du reste des calculs, et qui n'est donc pas forcément cohérente avec eux. Cela dit, il est certain que l'activation du remblai représente un coût supplémentaire par rapport au marché.

Il manque des ordres de grandeur de prix pour donner une estimation du coût de l'aménagement de la chaussée avec les dalles en béton préfabriquées. On peut cependant s'attendre à ce que la prise en compte du coût des racks et de l'ignifugation fasse significativement augmenter le coût total de cette variante, l'amenant ainsi à dépasser le coût de la chaussée sur remblai.

Il subsiste par ailleurs de nombreuses incertitudes sur la mise en œuvre de cette variante. Celle-ci nécessiterait donc des études supplémentaires et il est possible que les coûts s'avèrent plus grands que prévu. L'étude des réseaux humides présentée ci-dessus montre à quel point le coût d'une solution technique est difficile à établir sans une étude complète.

Il faut enfin remarquer que la variante ne répond pas à une demande explicite du client, ce qui diminue son intérêt par rapport à la solution proposée dans le marché.

Toutes ces raisons amènent à écarter la réalisation de la chaussée sur des dalles en béton préfabriquées et à maintenir la proposition initiale d'une chaussée sur remblai.

3 Détection des concentrations en poussière et en gaz

Lors de la phase d'excavation à l'explosif, l'air de la galerie doit rester respirable par le personnel qui y travaille. On fait l'hypothèse que la température ne sera pas un problème, car la dilution des gaz d'échappement sera le facteur dimensionnant. C'est donc la composition de l'atmosphère qui doit faire l'objet d'une surveillance. Il faut également ajouter le contrôle de la quantité de poussière en suspension dans l'air.

3.1 Poussières

Les poussières en suspension dans l'air sont classées en 3 fractions :

- Fraction alvéolaire (ou respirable) : les particules de cette fraction ont une taille comprise jusqu'à 10 μ . Elles pénètrent dans les alvéoles pulmonaires et s'y accumulent. La présence de silice provoque des silicoses : des grains se forment et combler progressivement les alvéoles, diminuant ainsi la capacité respiratoire.
- Fraction thoracique : il s'agit des poussières qui peuvent s'introduire jusque dans les bronches et les poumons. Les particules ont une taille comprise jusqu'à 30 μ . La plupart sont rejetées (toux, éternuements, sécrétions des muqueuses) mais elles peuvent néanmoins provoquer de l'asthme, des bronchites ou, à plus long terme, des cancers broncho-pulmonaires.
- Fraction inhalable : cette fraction comprend l'ensemble des poussières qui vont s'introduire dans l'organisme par la respiration. Cette fraction comprend des particules allant jusqu'à 100 μ . Ces poussières peuvent provoquer des inflammations ou, à plus long terme, des cancers des fosses nasales.

On définit des concentrations maximales acceptables pour chacune de ces fractions, selon la nature de la poussière. Ainsi pour la fraction alvéolaire, la présence de poussières siliceuses réduit la concentration maximale acceptable. Il convient donc, dans un premier temps, de mesurer la concentration en poussières des différentes fractions, et dans un second temps d'analyser la composition des poussières. On utilise pour cela deux types de mesures de concentration : une mesure discontinue, avec prélèvement et analyse des poussières, et une mesure continue réalisée par opacimétrie.

3.1.1 Mesure discontinue

Le principe de cette mesure est de connaître avec précision la moyenne sur un poste de la concentration en poussières, ainsi que la nature des poussières. On utilise pour cela un appareil constitué d'une pompe qui aspire de l'air avec un débit constant et d'un système de capture de la poussière. Ce système permet de prélever la poussière contenue dans l'air aspiré, en sélectionnant l'une des fractions si nécessaire.

L'appareil retenu est un CIP 10, dont le fabricant est l'entreprise ARELCO (figure 11). L'aspiration est provoquée par une coupelle en rotation, sur laquelle est fixé un filtre en mousse, qui va retenir les poussières de la fraction souhaitée. Une fois par mois, on fait porter cet appareil par un ouvrier de chantier pendant au moins huit heures, ou on le place au poste

de travail pendant huit heures. On retire alors la coupelle et on l'envoie au laboratoire ITGA-PRYSM.

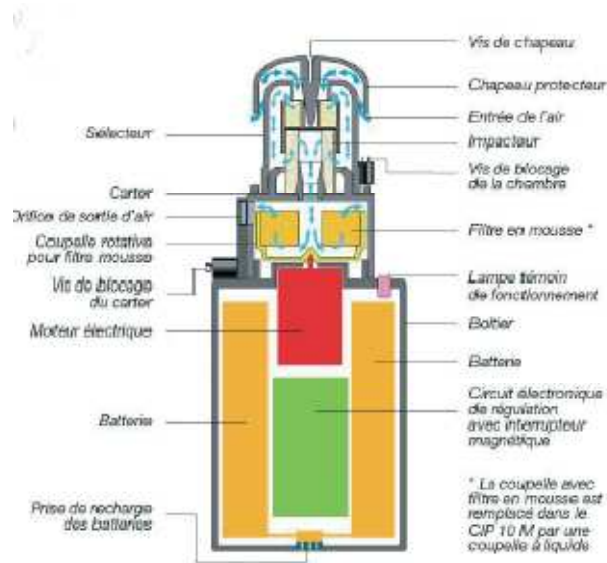


Figure 11 : Préleveur de poussière

Ce laboratoire intervient en réalité à deux moments. C'est en effet auprès de lui que l'on se procure les coupelles, car elles sont pesées individuellement. Lorsqu'on lui renvoie les coupelles, le laboratoire peut ainsi déterminer le poids de la coupelle chargée en poussière, et en déduire la quantité de poussière piégée. Le laboratoire procède ensuite à l'identification de ces poussières en brûlant le filtre, ce qui permet de récupérer uniquement les poussières et de les observer au microscope. L'ordre de grandeur du délai entre l'envoi de la coupelle et l'obtention des résultats étant de un mois, ce mode de mesure ne permet pas un suivi rapproché des concentrations en poussière. En cas de dépassement de la norme, il n'est pas possible de le savoir dans des délais permettant de prendre une mesure corrective adaptée aux conditions du moment.

3.1.2 Mesure continue

Il est donc nécessaire de mettre en place un système de mesure permettant d'obtenir des résultats avec un délai plus bref. L'idéal est d'avoir en permanence une mesure donnant un résultat immédiatement.

Il s'agit de mesures réalisées avec une grande fréquence (par exemple une mesure par minute). À chaque poste, un ouvrier porte un opacimètre Intertek AM 510 (figure 12). Cet appareil permet de déterminer la concentration en poussière d'une fraction donnée (inhalable, thoracique ou alvéolaire) et d'enregistrer les résultats de mesure. Mais ce type de mesure est encore mal maîtrisé dans les travaux souterrains, et puisque l'opacimètre est calibré à l'aide d'une poussière spécifique, la mesure de quantité est toujours incertaine. L'enregistrement permet donc une vérification ultérieure de la validité de ces résultats à l'aide des analyses effectuées avec le CIP 10.



Figure 12 : opacimètre

3.1.3 Utilisation concertée des deux types de mesures

Il faut donc essayer d'utiliser les deux types de mesure de manière coordonnée, afin de rester en dessous des seuils admissibles. On peut par exemple définir, selon la roche, des seuils de quantité de poussière mesurée par l'appareil de mesure continue. On peut vérifier si ces seuils sont adaptés aux seuils réels grâce aux mesures discontinues (mais il ne s'agit que de vérifications a posteriori).

3.2 Gaz

3.2.1 Gaz concernés

Les gaz dont il faut mesurer la concentration dans l'air sont : CH_4 , H_2S , CO , CO_2 , NO_2 , NH_3 et O_2 . La variation de la concentration de ces gaz a pour origine la combustion dans les moteurs thermiques (qui consomme O_2 et produit CO , CO_2 et NO_2) les tirs à l'explosif, ou encore la décomposition de matière organique dans certaines roches (CH_4 et H_2S).

La concentration de SO_2 devrait rester basse car le carburant utilisé est du gazole à faible teneur en soufre. Pour valider cette hypothèse, on procèdera à des mesures pendant deux semaines. Si ces mesures confirment la faible concentration en SO_2 on pourra se dispenser de les poursuivre. On pourrait également faire l'hypothèse que la concentration en O_2 ne baissera pas beaucoup tant que les autres gaz auront une concentration tolérable. En effet, les ordres de grandeur des variations tolérables par l'organisme sont très différents.

3.2.2 Valeur moyenne et valeur limite d'exposition

3.2.2.1 La V.L.E.

La Valeur Limite d'Exposition à court terme représente la concentration d'un gaz dans l'air que peut respirer une personne pendant un temps déterminé (15 mn maxi). Elle dépend

de la nature du risque, des conditions de travail et des possibilités techniques de contrôle de la concentration. Son respect permet d'éviter les risques d'effets toxiques immédiats.

3.2.2.2 La V.M.E.

La Valeur Moyenne d'Exposition est la valeur moyenne admise des concentrations auxquelles un travailleur est effectivement exposé, sur un poste de 8 heures. La VME peut être dépassée sur de courtes périodes, sous réserve de ne pas dépasser la VLE.

3.2.2.3 Valeurs

Gaz	Valeur moyenne d'exposition VME		Valeur limite d'exposition VLE	
	ppm	mg/m ³	ppm	mg/m ³
CO	50	55		
CO ₂			5000	9000
NO ₂			3	6
NH ₃	10	7	50	36
SO ₂	2	5	5	10
CH ₄	10 000			
H ₂ S	5	7	10	14

Il faut noter que l'odeur caractéristique du H₂S est décelable dès une concentration de 0.02 à 0.1 ppm. Cette odeur rend généralement le milieu de travail impraticable. On constate par ailleurs sur ce tableau que pour obtenir une variation sensible du taux d'oxygène dans l'air, il faut nécessairement que l'un des gaz toxiques atteigne une concentration trop élevée.

3.2.3 Appareils et mesures

La mesure de la concentration des gaz sera réalisée grâce à des balises de chantier et à des détecteurs portatifs. Tous ces instruments permettent d'enregistrer régulièrement les résultats des mesures sur un ordinateur.

Après chaque tir, le boutefeu mesure la concentration des gaz toxiques libérés au moment du tir à l'aide d'un détecteur portatif. Il vérifie, pour chacun des gaz concernés, que la concentration est bien descendue en dessous de la VME. Ces gaz sont CO, NO₂, NH₃, issus de l'explosif, et CH₄ qui ne risque d'être présent que peu après le tir.

Pendant toute la durée de la phase de marinage, une balise de chantier mesure la concentration des gaz suivants : H₂S, CO₂, et O₂. Cette balise doit être placée à l'abri des

ondes de choc dues aux tirs, ainsi que des concentrations trop élevées en gaz toxiques. Une telle exposition à des concentrations saturant les cellules de mesures risquerait de les endommager. Il s'agit donc de laisser ces balises un peu en amont de la ventilation soufflante, suffisamment loin du front pour éviter que la concentration en gaz n'atteigne des valeurs trop élevées.

Tous ces appareils sont présents en trois exemplaires, afin de permettre d'en utiliser un par poste. Ceci permet également un fonctionnement en cas de panne d'un des appareils.

Conclusion

Ce travail aura permis de découvrir plusieurs études menées sur un chantier d'excavation de tunnel lors de sa phase préparatoire. Une étude des choix techniques à faire pour l'installation des réseaux humides en radier montre que les documents du marché sont incomplets et qu'il est envisageable de proposer une solution différente. Cette étude attire l'attention sur la grande sensibilité des études à des paramètres parfois négligés.

Ceci montre l'intérêt et la difficulté d'une seconde étude, portant sur l'aménagement du radier du tunnel excavé au tunnelier. Cette étude demande de se pencher sur de nombreux paramètres mal maîtrisés. On arrive néanmoins à un chiffrage assez proche de deux variantes, et c'est la solution prévue au marché qui l'emporte car les incertitudes à son égard sont plus réduites.

Ce rapport se penche enfin sur une problématique liée plus directement aux travaux, celle de la détection des gaz et des poussières, en décrivant une procédure encore mal maîtrisée.

Cela montre à quel point les méthodes et les coûts sont sensibles aux moindres détails. Au moment d'opter pour une solution technique, il semble donc qu'il faille au maximum rechercher le détail qui rend une solution improbable plutôt que de tenter de chiffrer le coût de celle-ci. Pour cela, l'expérience est un atout irremplaçable et permet d'évaluer le risque que présente une méthode donnée.

Références bibliographiques

Pièces du marché, en particulier le CCTP et le CCAP.

Site internet de la Société française du tunnel du Fréjus.

Sites internet et brochures des fournisseurs.

Annexes

Annexe 1 : phasage pour l'aménagement du radier

VARIANTE

- ❖ Préfabrication sur place
 - Fabrication du béton dans la centrale
 - Transport du béton
 - Préparation des moules, des réservations, du ferrailage
 - Béton coulé dans les moules
 - Démoulage
 - Transport et stockage des éléments

Avancement du tunnelier

- ❖ Déplacement d'une rampe d'accès (?)
- ❖ Mise en place des réseaux (conduites d'eaux usées, etc.) et des supports (racks, etc.)
- ❖ Mise en place de la ventilation soufflante et aspirante (provisoire et/ou définitive.)
- ❖ Mise en place de la chaussée provisoire à l'arrière du tunnelier (?)
 - Chargement et transport des éléments préfabriqués depuis la zone de stockage
 - Déchargement
 - Pose des éléments préfabriqués
 - ◆ Pose d'un appui en caoutchouc
 - ◆ Pose de la cloison centrale
 - ◆ Forage de trous dans les voussoirs, chevillage de la cloison aux voussoirs
 - ◆ Pose des appuis en caoutchouc
 - ◆ Pose des dalles, vissage des dalles à la cloison
 - ◆ Forage de trous dans les voussoirs, chevillage des dalles aux voussoirs
 - ◆ Comblement des réservations (par du béton)
 - ◆ Équipement pare-feu

Avancement du tunnelier

- ❖ Mise en place de la couche de roulement

BASE

- ❖ Mise en place de la chaussée provisoire (et entretien ?) : **simultané à l'avancement** (durée : 16 mois.)
 - Mise en place des canalisations pour les eaux usées et les eaux de ruissellement
 - Fabrication du remblai activé
 - ♦ Chargement du remblai sur des tombereaux dans la zone de stockage (provisoire ?)
 - ♦ Transport
 - ♦ Déchargement des tombereaux
 - ♦ Approvisionnement en remblai de la centrale à béton du tunnel
 - ♦ Chargement de sacs de ciment dans un camion
 - ♦ Trajet et déchargement du camion
 - ♦ Approvisionnement en ciment de la centrale à béton du tunnel
 - Remblayage
 - ♦ Chargement du remblai activé dans des bennes
 - ♦ Transport du remblai activé et déchargement des bennes
 - ♦ Mise en place du remblai (épaisseur des couches à définir)
 - ♦ Compactage
- ❖ Mise en place de la chaussée définitive : **après l'excavation** (durée à définir.)
 - Remise à niveau
 - ♦ Destruction au BRH des rampes d'accès aux rameaux
 - ♦ Chargement et évacuation des déblais
 - Mise en place des multitubulaires et réseaux divers
 - Remblayage
 - ♦ Chargement du remblai sur des tombereaux dans la zone de stockage (provisoire ?)
 - ♦ Transport
 - ♦ Déchargement des tombereaux
 - ♦ Mise en place du remblai
 - ♦ Compactage
 - Grave ciment
 - Grave bitume
 - Bitume

Annexe 2 : quantités pour l'aménagement du radier

Longueur du tronçon excavé au tunnelier	4 840 m
Durée de cette phase	16 mois

BASE		
Couche de forme grave ciment	6 476 m3	?
Préparation du support et accrochage	99 000 m2	
Grave bitume	33 000 m2	
Couche de roulement	33 000 m2	
Remblai activé pour la piste provisoire : niveau de	15 955 m3	(marché : ~ 29000 m3)
Rajout de remblai jusqu'au niveau définitif	17 421 m3	
Ciment	1 522 m3	

VARIANTE	
Préparation du support et accrochage	33 000 m2
Couche de roulement	33 000 m2
Racks pour les câbles	?
Nombre d'ensembles	2 689 u
soit un nombre d'éléments	8 067 u
Béton	8 896 m3
Acier	1 498 t
Moules	27 u

au minimum pour une cadence moyenne

Annexe 3 : coûts de l'aménagement du radier

Prix en k€	
Marché	
Réalisation de la piste de roulement et remblai	630
Chaussée	2 391
Réseaux	4 264
TOTAL :	7 285

Base	
Réalisation de la piste de roulement et remblai	722
Activation du remblai	1 625
Chaussée	2 391
Réseaux	4 264
TOTAL :	9 001

Variante	
Fabrication éléments	3 388
Transport	699
Fournitures pour la fixation	577
Mise en place	1 138
Chaussée	555
Réseaux	1 836
TOTAL :	8 192

**Manquent les
racks !**

Table des matières

1	Réseaux humides.....	7
1.1	Réseaux concernés.....	7
1.2	Réseaux d'adduction.....	7
1.2.1	Raccords	7
1.2.2	Phasage.....	8
1.3	Réseaux d'évacuation	9
1.3.1	Piquages	9
1.3.2	Adaptation de la méthode.....	10
1.4	Conclusion	10
2	Étude de l'aménagement du radier.....	11
2.1	Étude de la proposition initiale d'aménagement du radier	11
2.1.1	Niveau	11
2.1.2	Remblai	12
2.2	Étude d'une variante	13
2.2.1	Éléments préfabriqués	13
2.2.2	Production et mise en place : cadences	14
2.2.3	Chaussée.....	15
2.2.4	Sécurité incendie et isolation.....	16
2.2.5	Déblai	16
2.2.6	Ventilation.....	16
2.3	Résultats de l'étude.....	17
2.3.1	Phasage.....	17
2.3.2	Quantités.....	17
2.3.3	Coûts.....	17
2.4	Conclusion	19
3	Détection des concentrations en poussière et en gaz.....	20
3.1	Poussières	20
3.1.1	Mesure discontinue	20
3.1.2	Mesure continue	21

3.1.3	Utilisation concertée des deux types de mesures	22
3.2	Gaz.....	22
3.2.1	Gaz concernés	22
3.2.2	Valeur moyenne et valeur limite d'exposition	22
3.2.3	Appareils et mesures	23