

Contraintes logistiques dans les grands chantiers souterrains : les matériaux excavés du CO 05 du tunnel de base du Lyon - Turin

Logistical constraints on huge underground works: excavated material in the construction site 05 of the Lyon - Turin Base tunnel

François REDOUTEY, *ALLTI GEIE, Aix-les-Bains, France*

Nathalie MONIN, *ALLTI GEIE, Aix-les-Bains, France*

Pascal SCHRIQUI, *TELT, Le Bourget-du-Lac, France*

Jacques BURDIN, *TELT, Le Bourget-du-Lac, France*

Gérard SEINGRE, *ALLTI GEIE, Aix-les-Bains, France*

Résumé

La réalisation du tunnel de base du Mont-Cenis, ouvrage clé de 57,5 km de la future liaison ferroviaire Lyon-Turin, présente de nombreux enjeux du fait de la nature des ouvrages mais aussi du contexte des accès logistiques imposés par les 3 descenderies existantes, en zone alpine.

Pour achever un tel ouvrage dans les délais impartis, la logistique devient un enjeu majeur du projet. Les travaux réalisés à partir de l'attaque de Villarodin-Bourget/Modane (chantier opérationnel 5 ou CO 05) sont particulièrement sujets à celui-ci que ce soit pour la logistique de surface ou souterraine.

Le CO 05 générera à lui seul 11,4 Mt de matériaux excavés depuis plusieurs fronts creusés en méthode conventionnelle et au tunnelier. Dans ce contexte, les approvisionnements, le traitement, la mise en dépôt ou l'évacuation des matériaux d'excavation sont régis par des facteurs limitants logistiques et techniques dont notamment la capacité des sites de dépôt, des itinéraires d'accès routiers et ferroviaires, des stations de transformation des matériaux. La prise en compte de ces contraintes doit permettre de ne pas ralentir les excavations et de satisfaire la demande en granulats (issus des matériaux excavés) pour réaliser les bétons du tunnel.

En phase de conception, toutes ces contraintes ont été considérées comme des données d'entrée à intégrer dans le programme des travaux. Les analyses ont finalement abouti à la définition de prescriptions reportées dans le DCE du CO 05 pour que les soumissionnaires aient connaissance de ces contraintes et puissent gérer les effets dans leurs offres.

Abstract

The construction of the Mont-Cenis Base tunnel, a 57.5 km key structure of the future rail link between Lyon and Turin, contains many issues due to the nature of the works to be carried out, but also due to the constrained logistical accesses of the 3 existing access galleries in the Alpine context.

To complete the construction of the tunnel on time, logistics has become a major challenge of the project. The underground works carried out from the Villarodin-Bourget/Modane drive (workpackage called "Chantier Opérationnel 05" or "CO 05") are particularly critical works regarding both underground and surface logistics.

CO 05 alone will generate 11.4 Mt of excavated material from different types of drive: Drill and Blast and TBM. In this context, material supplies, processing, deposit or evacuation of the muck are limited by logistical and technical factors, such as the capacity of depositories, rail and road access routes, or material processing stations. Taking these constraints into account should avoid slowing down excavations and answer the demand of aggregates (made from excavated material) to make the tunnel concrete.

During the design phase, all these constraints have been considered as input data to be integrated in the work program. The analyses eventually led to the definition of prescriptions reported in the call for tenders of the CO 05, so that the contractors could be aware of these constraints and manage the induced effects in their offers.

Contraintes logistiques dans les grands chantiers souterrains : les matériaux excavés du CO 05 du tunnel de base du Lyon - Turin

Logistical constraints on huge underground works: excavated material in the construction site 05 of the Lyon - Turin Base tunnel

François REDOUTEY, ALLTI GEIE, Aix-les-Bains, France

Nathalie MONIN, ALLTI GEIE, Aix-les-Bains, France

Pascal SCHRIQUI, TELT, Le Bourget-du-Lac, France

Jacques BURDIN, TELT, Le Bourget-du-Lac, France

Gérard SEINGRE, ALLTI GEIE, Aix-les-Bains, France

1 Introduction

Les grands projets d'infrastructures, notamment ceux constitués de tunnels de grande longueur, sont générateurs d'une importante quantité de déblais mais également très consommateurs en matériaux (remblais, béton, ...). Le tunnel de base de la nouvelle ligne Lyon Turin, d'une longueur supérieure à 57 km, n'échappe pas à cette règle, et les accès imposés par les trois descenderies existantes situées en zone alpine augmentent la complexité du chantier. Ainsi, les contraintes logistiques inhérentes au Chantier Opérationnel 05 (CO 05), à partir de la descenderie de Villarodin-Bourget/Modane (VBM) ont fortement orienté les choix techniques opérés par le maître d'œuvre en phase de conception.

1.1 Le contexte du Chantier Opérationnel 05

Le Chantier Opérationnel 05, dont la maîtrise d'œuvre a été confiée par le maître d'ouvrage TELT au groupement ALLTI GEIE en 2018, consiste en la réalisation du tunnel de base de la nouvelle ligne Lyon Turin à partir de l'attaque de la descenderie existante de Villarodin-Bourget / Modane.

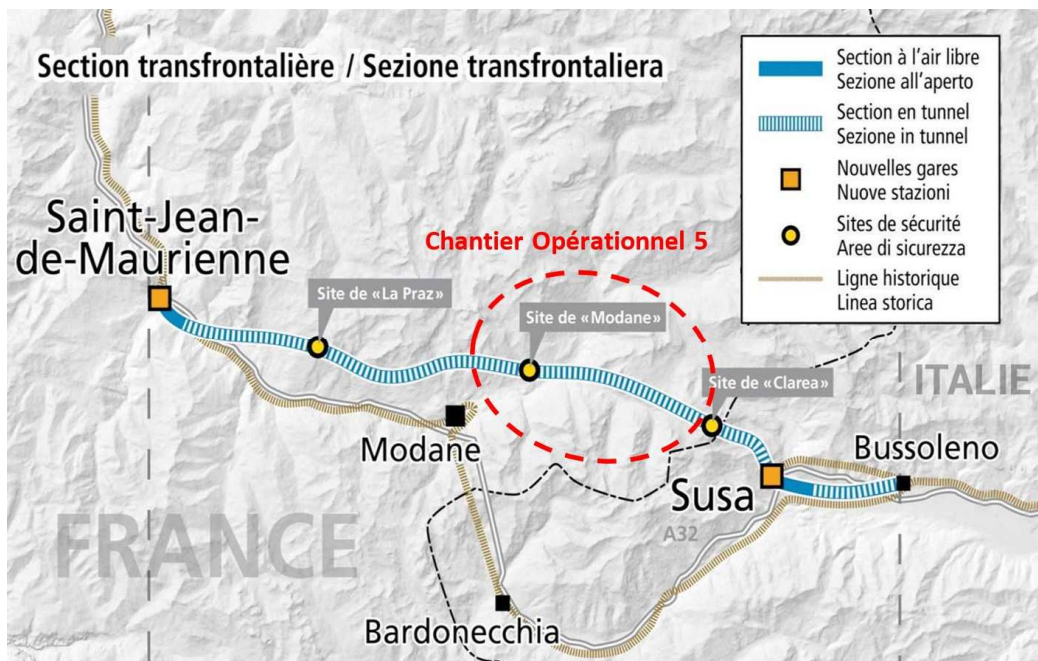


Figure 1. Situation du Chantier Opérationnel 05

Les travaux de ce chantier opérationnel comprennent notamment :

- La réalisation d'un site de sécurité en pied de descenderie creusé à l'explosif, principalement vers l'ouest, d'une longueur d'environ 3 km, comprenant deux voies de service, une galerie intertube et deux voies d'évitement ;

- Le creusement au tunnelier des deux tubes, de 18 km chacun, vers l'est, constituant le tunnel de base entre le site de sécurité de Modane et le site de sécurité de Clarea.

Sur les 6 ans de travaux prévus, ce sont ainsi 11,4 Mt de matériaux qui vont être excavées. Quant aux besoins en granulats pour la fabrication des bétons, ceux-ci atteignent 3,4 Mt. Ces volumes conséquents ont amené à développer une stratégie de gestion et emploi des matériaux excavés (GEME).

La GEME vise ainsi à optimiser les ressources et les besoins en matériaux au sein du projet, en tenant compte des contraintes logistiques, afin de satisfaire les objectifs suivants :

- Limiter la mise en dépôt des matériaux excavés ;
- Limiter le transport des matériaux ;
- Préserver la ressource minérale en limitant les apports extérieurs et en maximisant la valorisation des matériaux excavés ;
- Assurer le bon fonctionnement du chantier en termes d'évacuation et d'approvisionnement ;
- Minimiser l'impact économique et environnemental sur le projet.

1.2 Les contraintes logistiques du chantier

Dans le cas du Chantier Opérationnel 05, la fonction principale (FP1 sur la fig. 2) consiste à transformer les matériaux produits par l'excavation pour les besoins propres du chantier en granulats pour béton. Cette fonction est néanmoins fortement dépendante des volumes excavés ou à revêtir, qui peuvent évoluer selon les aléas géologiques et constructifs rencontrés, ainsi que de l'ordonnancement des travaux de creusement et de revêtement.

Situé en contexte montagneux, en fond de vallée, le CO 05 comporte également de nombreuses contraintes logistiques dimensionnantes pour le déroulement du chantier (fonctions FC1 à FC5 sur la fig. 2). L'achèvement de l'ouvrage dans les délais impartis passe nécessairement par la prise en compte de ces contraintes dès la phase de conception.

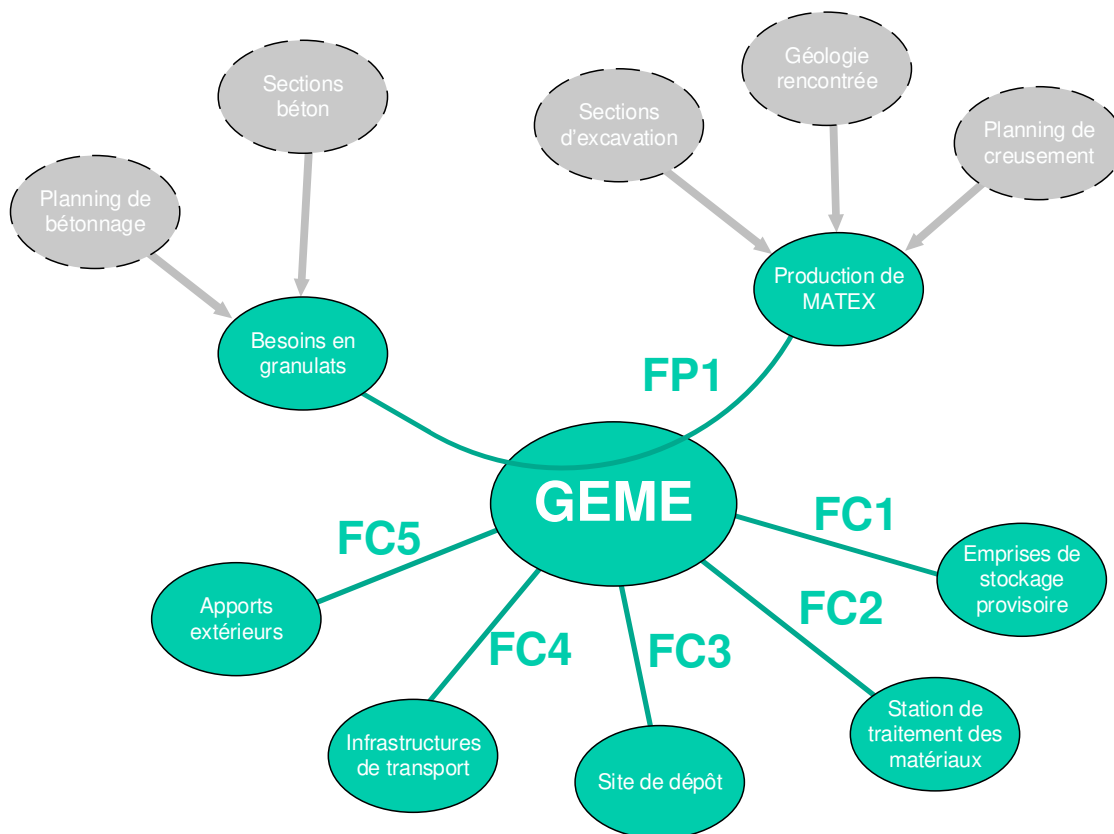


Figure 2. Fonctions principale et contraintes de la GEME

Les facteurs limitants sont ainsi de plusieurs ordres :

- La capacité de stockage provisoire des matériaux sur site est restreinte, et estimée à environ 200 kt (FC1, fig. 2) ;
- Les caractéristiques des granulats dépendent d'une part de la géologie rencontrée mais aussi du dimensionnement et des réglages de la station de traitement des matériaux (STM), comme représenté par la fonction FC2 de la fig. 2. Cette STM possède par ailleurs une capacité de production limitée (cf. § 2.3.)
- La capacité de mise en dépôt définitif des matériaux sur place est limitée (FC3, fig. 2) et ne couvre pas l'intégralité de la production de matériaux : le site de dépôt des Tierces ne peut ainsi accueillir que 5,0 Mt sur les 11,4 Mt excavées ;
- Les approvisionnements et les évacuations de matériaux se font soit par voie routière via une piste de chantier, soit par voie ferroviaire via un site de chargement qui doit être construit spécifiquement (FC4, fig. 2). Or, la piste de contournement de Modane permettant l'accès au chantier possède une capacité limitée, et le nombre de sillons ferroviaires disponibles pour le CO 05 est estimé à deux par jour, soit une capacité d'évacuation journalière de 1 800 t.

Ces contraintes doivent être appréciées au regard de l'ampleur du chantier : au plus fort de l'excavation, 3 fronts excavés en méthode conventionnelle viennent s'ajouter aux deux fronts creusés par les tunneliers. Ce sont ainsi 345 kt de matériaux qui peuvent être générées par mois.

1.3 Classification des matériaux excavés

Les nombreuses études menées par TELT depuis le début des années 2000 ont permis de caractériser les formations géologiques qui sont traversées par les ouvrages du tunnel de base pour les besoins propres au projet.

Ainsi, le CO 05 excavera majoritairement dans la zone briannonnaise interne, qu'elle soit rattachée à l'ouest au massif de la Vanoise (site de sécurité), ou à l'est au massif d'Ambin. Les lithologies associées sont essentiellement des micaschistes, quartzites et gneiss (formations de violet à rose sur la coupe géologique prévisionnelle). Une alternance de formations anhydritiques (jaune à vert clair), dolomitiques (vert foncé) et carbonatées (bleu) seront également traversées entre le massif de la Vanoise et le massif d'Ambin.

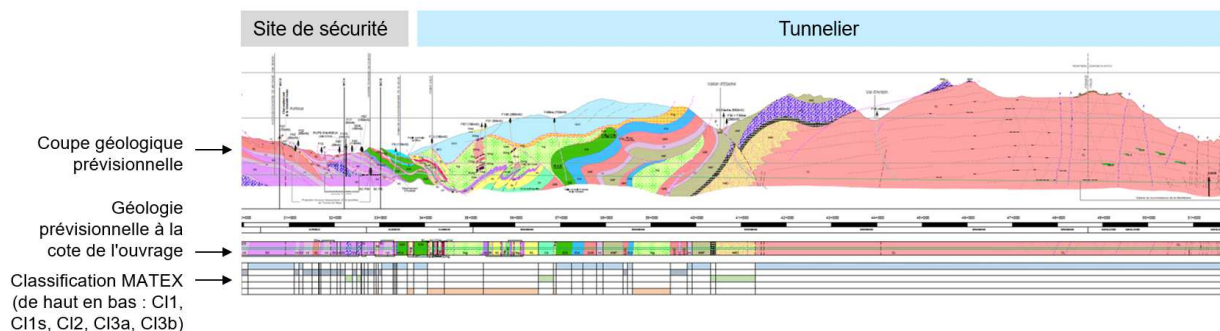


Figure 3. Coupe géologique prévisionnelle et classification des MATEX

Sur la base des essais de caractérisation, plusieurs classes de matériaux ont été définies, selon le modèle de la recommandation du GT 35 R1F2 :

- Classe C1 : roches de bonne qualité, dont les caractéristiques mécaniques et minéralogiques permettent l'utilisation comme matériaux pour la production de granulats pour béton ;
- Classe C1s : nouvelle classe créée, cf. § 2.2 ;
- Classe C2 : roches dont les caractéristiques permettent la production de matériaux pour la construction de remblais ;
- Classe C3 : roches dont les caractéristiques ne permettent pas une utilisation pour les besoins propres au projet et qui seront mises en dépôt. Cette classe est subdivisée en deux afin de répondre à la réglementation : la classe C3a autorisant la mise en dépôt en installation de

stockage de déchets inertes (ISDI) ou en remblais paysagers, et la classe 3b pour les matériaux dangereux type amiante ou évolutifs type gypse/anhydrite par exemple.

La répartition estimée des 11,36 Mt de matériaux excavés par classe est présentée sur la figure 4. La moitié des matériaux excavés par le CO 05 sont de classe CI1, et constituent donc une ressource importante pour pouvoir être transformée en granulats pour béton. Les matériaux de classe CI1s sont par ailleurs définis au § 2.2.

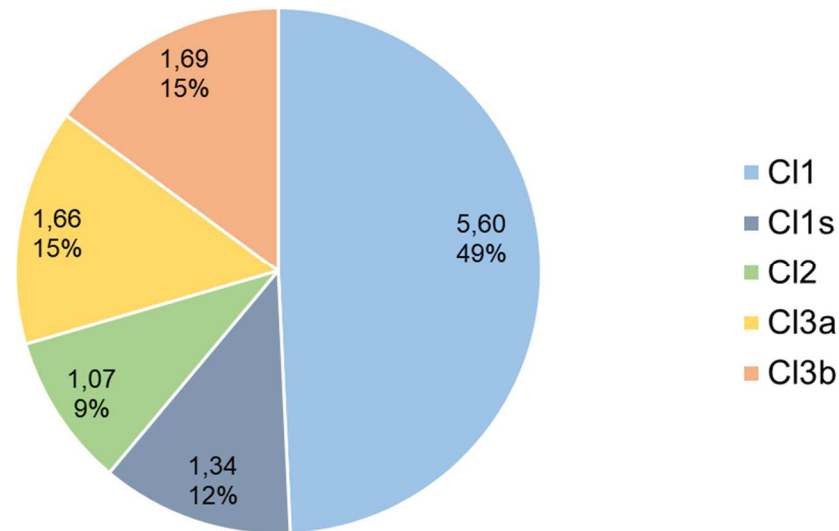


Figure 4. Répartition par classe des matériaux excavés du CO 05 (en Mt)

2 Les solutions adoptées

2.1 Gestion dynamique des matériaux

Compte-tenu des flux importants de matériaux d'excavation (MATEX) et des faibles emprises disponibles pour le stockage des matériaux, le temps joue un rôle fondamental dans la logistique des matériaux. Il est donc nécessaire que les MATEX soient pré-classés avant leur chargement sur les convoyeurs à bande afin d'atteindre leur destination finale le plus rapidement possible.

La logistique en souterrain du CO 05 a fait l'objet d'un article lors du dernier World Tunnel Congress à Naples (Janutolo et al. 2019). Pour sécuriser le marinage dans la partie souterraine, en particulier dans les 2 tubes excavés au tunnelier, il a été privilégié un marinage par trains sur pneus ou véhicules multi-services depuis le front jusqu'à une caverne technique (fig. 5) permettant de reprendre et transférer le marin vers l'extérieur par la descenderie.

Le gabarit de la descenderie existant permet d'installer trois convoyeurs à bande au maximum. Deux convoyeurs de 1350 t/h remontent la descenderie et permettent d'acheminer les matériaux excavés jusqu'en surface où ils sont orientés à l'aide d'une tour de répartition vers les sites de stockage appropriés (provisoires ou définitifs). Les granulats sont eux acheminés depuis la surface jusqu'à la centrale à béton située au niveau de la caverne logistique par un convoyeur de 300 t/h. L'évacuation des matériaux est séquencée de manière à donner la priorité aux excavations par tunneliers par rapport aux excavations en conventionnel du site de sécurité. Un stock tampon au niveau de la niche au pied de la descenderie permet de stocker provisoirement le marin issu des fronts à l'explosif, le temps qu'un des deux convoyeurs soit disponible.

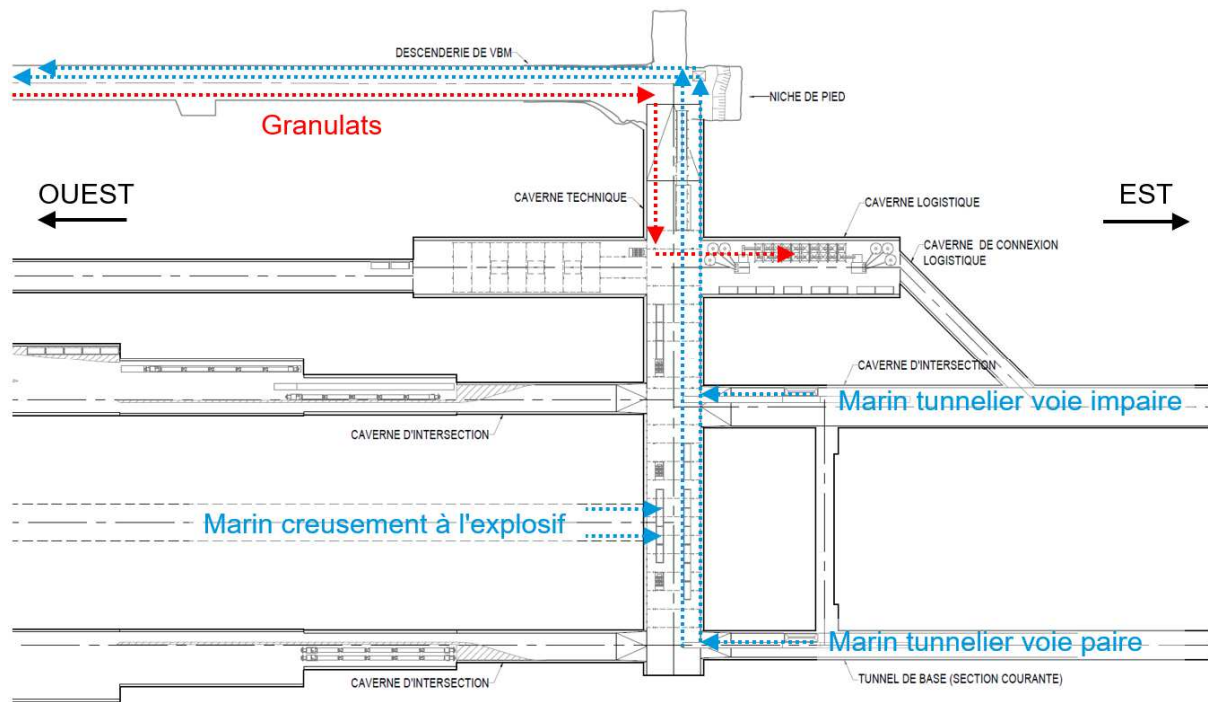


Figure 5. Flux des matériaux dans la caverne technique

La figure 6 ci-après résume les principales opérations de gestion des matériaux effectuées sur site. Le pré-classement est initié en amont de l'excavation selon la maquette géologique prévisionnelle. Les forages de reconnaissance à l'avancement permettent de confirmer ou d'ajuster le pré-classement des MATEX par rapport à cette maquette, par la détection anticipée des changements de géologie.

Le pré-classement se poursuit ensuite dans la zone du front (front de taille pour les excavations en conventionnel, levés de parement et à la chute du convoyeur du tunnelier pour les excavations au tunnelier), essentiellement par l'observation visuelle du MATEX. Les essais de type Franklin (*point load test*) réalisés en surface sur des échantillons prélevés au point de chute ne servent qu'à confirmer ou infirmer le pré-classement.

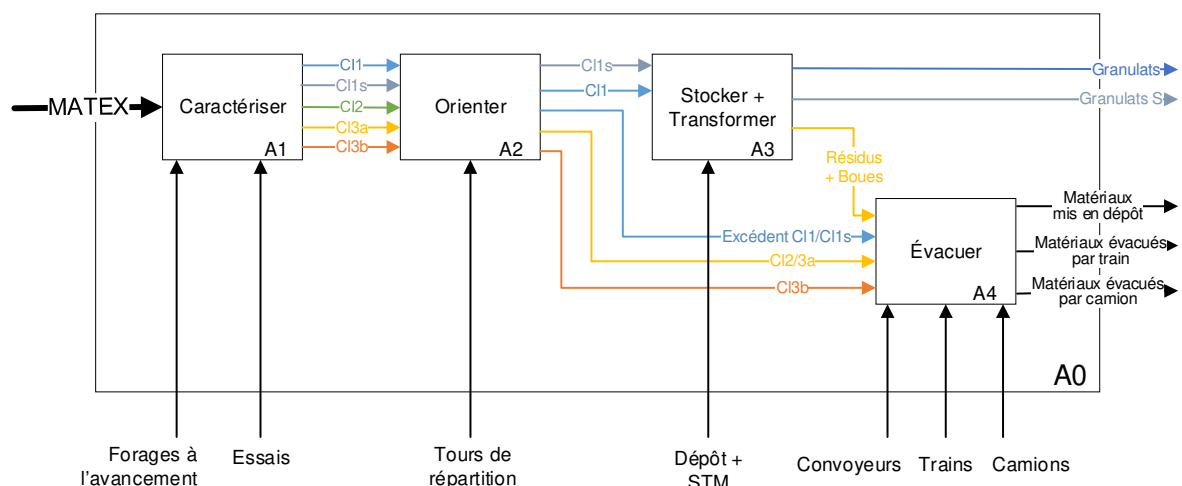


Figure 6. Actigramme simplifié de la GEME

Une fois le MATEX pré-classé livré sur les stocks provisoires en surface, il est caractérisé en détail pour valider son classement et orienter en fonction de l'utilisation associée vers les bonnes installations : station de transit, station de traitement, installations de stockage (ISDI, ISDND, etc.).

2.2 Cas des matériaux C11 sulfatés

Lors de l'excavation de la descenderie de Villarodin-Bourget/Modane (VBM), une STM expérimentale a été installée sur site (cf. fig. 7) pour traiter et transformer les matériaux issus des 3 descenderies en cours de creusement. Le retour d'expérience de la descenderie de VBM a induit un déclassement des micaschistes quartzitiques du Permo-Trias, initialement prévus en C11, du fait de leur teneur en sulfates supérieure à 0,2% (seuil maximal autorisé par la norme NF EN 12620 pour une utilisation en granulats pour béton). Ces matériaux, considérés comme de classe C11 du point de vue de leurs caractéristiques mécaniques mais potentiellement sulfatés, sont désormais attribués à une nouvelle classe : la classe C11s. Ils sont très majoritairement situés au niveau du site de sécurité de Modane.

Ces matériaux représentent potentiellement une quantité de 1,3 Mt à traiter. L'emploi d'une partie de ces MATEX permettrait toutefois d'accroître la part de valorisation des matériaux et de diminuer drastiquement le déficit en granulats au début du chantier, rendant le CO 05 quasi autonome de ce point de vue. C'est pourquoi, TELT mène depuis 2009 un programme de R&D sur la durabilité des bétons conçus avec ces matériaux plus sulfatés que la norme. Les résultats sont encourageants, et sont actuellement soumis à la commission AFNOR P18B dans le but de normaliser un test de performance et au CSTB pour obtenir un avis technique de type ATE_x, et d'en permettre ainsi leur utilisation de granulats (Hugot et al. 2019).



Figure 7. Station de traitement des matériaux de Modane, lors de l'excavation de la descenderie (2002)

2.3 Planning de bétonnage

L'excavation au tunnelier de chacun des deux tubes de 18 km étant sur le chemin critique vis-à-vis du planning général du CO 05, il est indispensable de réaliser le revêtement du tunnel concomitamment à l'excavation de celui-ci.

En termes de gestion des matériaux, il est également indispensable d'enchaîner le revêtement derrière le tunnelier : en effet, le revêtement et le radier de chaque tube nécessitent environ 1 058 kt de granulats. Or, les emprises disponibles sur le site ne permettent de stocker qu'environ 200 kt de C11 (permettant la production d'environ 140 kt de granulats). Par conséquent, la réalisation du revêtement et du radier après la fin de l'excavation, si le planning le permettait, nécessiterait de transporter et de stocker jusqu'à 2,8 Mt de C11.

Cette méthode de revêtement derrière le tunnelier a déjà été mise en place lors du creusement du tunnel du Gothard en Suisse (Gruber et al. 2011). Un dispositif appelé "Wurm" ("ver" en français), présenté sur la figure 8, permettait de réaliser l'étanchéité et le revêtement du tunnel tout en laissant passer les trains de marouflage et d'approvisionnement du tunnelier.



Figure 8. Dispositif Wurm du tunnel du Gotthard, lot Bodio Faido

En réalisant le revêtement et le radier parallèlement à l'excavation, outre les emprises permettant de stocker 2,8 Mt de C11 qui sont économisées, ce sont aussi près de 280 000 rotations de camions qui sont évitées !

Un autre avantage de réaliser le revêtement en même temps que l'excavation est de limiter la cadence de production de granulats. En effet, si le revêtement était fait après l'excavation, plusieurs ateliers pourraient être mis en place en parallèle sur chaque tube. Quand bien même il serait possible de stocker sur place l'ensemble des matériaux nécessaires à l'élaboration des granulats, la demande en granulats serait bien trop élevée pour que la station de traitement des matériaux (STM) puisse suivre cette cadence.

Avec la configuration retenue en conception du CO 05 (fig. 9), les besoins mensuels en granulats sont en moyenne de 60 à 70 kt/mois. Cette demande peut alors être satisfaite à l'aide d'une STM, implantée en surface à proximité de la descenderie, d'une capacité proche de celle qui a été mise en place à Rarogne pour le tunnel de base du Lötschberg en Suisse.

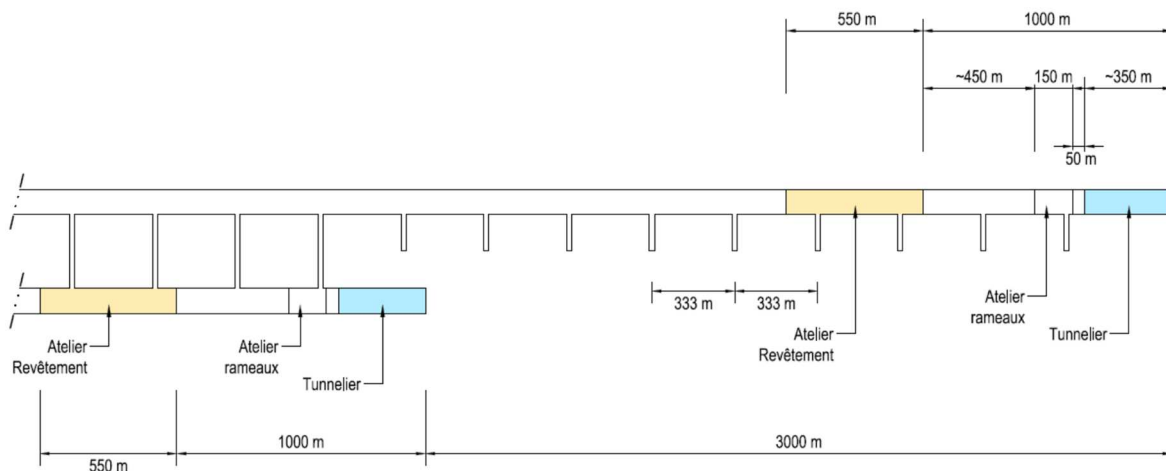


Figure 9. Principe d'avancement des deux tubes

2.4 Lissage des flux d'évacuation

Les excavations du CO 05 généreront 11,4 Mt de matériaux d'excavation, dont environ 5,6 Mt de classe C11. Les besoins en granulats pour la réalisation du béton projeté, du radier et du revêtement, sont quant à eux estimés à 3,4 Mt (soit environ 4,9 Mt de C11 transformé). De plus, la capacité du site de dépôt des Tierces, situé à proximité immédiate du chantier est d'environ 5,0 Mt.

Par conséquent, même dans le cas optimiste où 100% des granulats sont produits à partir des matériaux d'excavation, il restera au minimum 3,0 Mt de matériaux excédentaires à évacuer au-delà du site de Villarodin-Bourget/Modane.

Une solution classique dans la gestion des matériaux serait de remplir en premier lieu le site de dépôt des Tierces puis, lorsque celui-ci est saturé, d'évacuer les matériaux excédentaires vers des sites extérieurs. Or, un tel schéma conduirait à un flux mensuel moyen d'évacuation de plus de 105 kt/mois (soit en moyenne l'équivalent de 260 rotations de camions par jour, pour la seule évacuation de matériaux). Un tel flux est difficilement compatible avec les infrastructures routières, et en particulier la piste de contournement de Modane pour rejoindre l'autoroute A43 en sortie du tunnel du Fréjus.

La solution qui a été adoptée au stade du PRO consiste à évacuer les matériaux excédentaires au fur et à mesure du chantier, dès le début des excavations. Ce lissage des flux d'évacuation permet ainsi de passer à une moyenne d'environ 50 kt/mois de matériaux à évacuer (fig. 10).

Cette prescription devra être déclinée dans le futur marché de travaux de gestion des matériaux (Chantier Opérationnel 11).

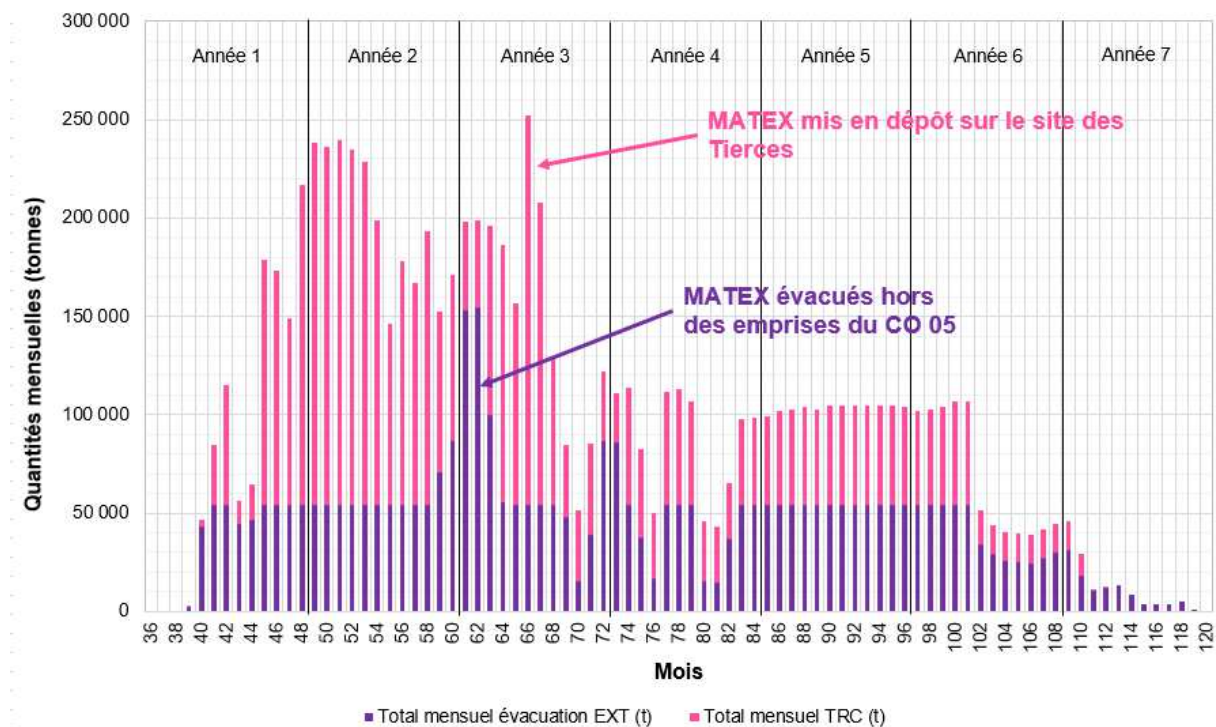


Figure 10. Quantités mensuelles de matériaux évacués hors des emprises du CO 05 ou mis en dépôt

2.5 Revêtement coulé en place ou voussoirs préfabriqués ?

Une analyse multicritère a été réalisée afin d'étudier notamment les effets sur la logistique liés à l'utilisation de voussoirs préfabriqués pour la réalisation du revêtement et/ou du radier (voussoirs de radier préfabriqués). Les emprises disponibles au niveau du site de VBM ne permettent ni d'installer une usine de préfabrication de voussoirs, ni de stocker une production suffisante pour pouvoir alimenter les deux tunneliers. Par conséquent, en cas de recours à des voussoirs, le site de fabrication doit être déporté ailleurs dans la vallée de la Maurienne (voire à l'extérieur de la vallée). Cet éloignement du site de production de voussoirs par rapport au site de production des granulats et au site d'emploi de ces voussoirs entraîne *de facto* une augmentation significative des flux de matériaux (MATEX, granulats, voussoirs) sur les voies d'accès au CO 05. Deux cas de figure sont alors envisageables :

- Cas où les voussoirs sont réalisés avec des granulats extérieurs : dans ce cas il y a une production de plus d'un million de tonnes de granulats en moins par la STM. En termes d'évacuation, cela représente également plus d'un million de tonnes de MATEX supplémentaires à évacuer (soit environ 20 kt/mois supplémentaires), auquel il faut ajouter les rotations de camions nécessaires à l'approvisionnement des voussoirs. Par ailleurs, il faudra également trouver des exutoires pour ces MATEX non utilisés sur le chantier, avec un taux de valorisation qui chutera significativement ;

- Cas où les voussoirs sont réalisés avec des MATEX : les granulats devront être transportés de la STM vers l'usine de préfabrication (cela représente entre 25 à 30 kt/mois de granulats à évacuer). Il faudra là encore ajouter les convois de voussoirs à acheminer de l'usine vers le site de VBM. Ce dernier cas présente l'avantage de maintenir le taux de valorisation mais l'inconvénient d'augmenter significativement les flux routiers associés.

Avec un tunnelier à voussoirs, les espaces de stockage nécessaires augmentent donc significativement, tout comme les flux d'approvisionnements et d'évacuations qui deviennent critiques et pourraient causer de forts ralentissements dans la réalisation du chantier... C'est pourquoi, une solution de base avec un revêtement coulé en place a été privilégiée en phase de conception.

3 Conclusion

Au commencement de la phase projet (PRO), plusieurs contraintes logistiques majeures, liées en grande partie à la gestion et l'emploi des matériaux d'excavation (GEME), ont été recensées. Le maître d'œuvre a ainsi pu proposer une conception qui en tient compte, et qui se traduit par des choix constructifs forts (réalisation des revêtements en même temps que l'excavation, lissage des flux d'évacuation, etc.) qui ont été déclinés en conséquence dans le dossier de consultation des entreprises (DCE). Plusieurs analyses de sensibilité ont été menées, et 12 scénarios ont ainsi pu être modélisés pour mettre en avant les impacts de l'utilisation ou non du CI1s, de la méthode de revêtement (voussoirs / coulé en place), des capacités de stockage, des modes d'évacuation, etc. À l'issue du PRO, le maître d'ouvrage a opté pour un seul scénario intermédiaire, sans utilisation de voussoirs préfabriqués, avec une évacuation uniquement routière des MATEX, et en se laissant la possibilité d'utiliser les MATEX de classe CI1s si les conditions réglementaires le permettent.

Le synoptique des flux de matériaux pour l'un de ces scénarios est ainsi présenté sur la figure 11 ci-dessous. Dans celui-ci, plus de 85% des granulats du CO 05 sont fabriqués à partir de matériaux excavés, ce qui est à la fois ambitieux mais tout-à-fait réalisable.

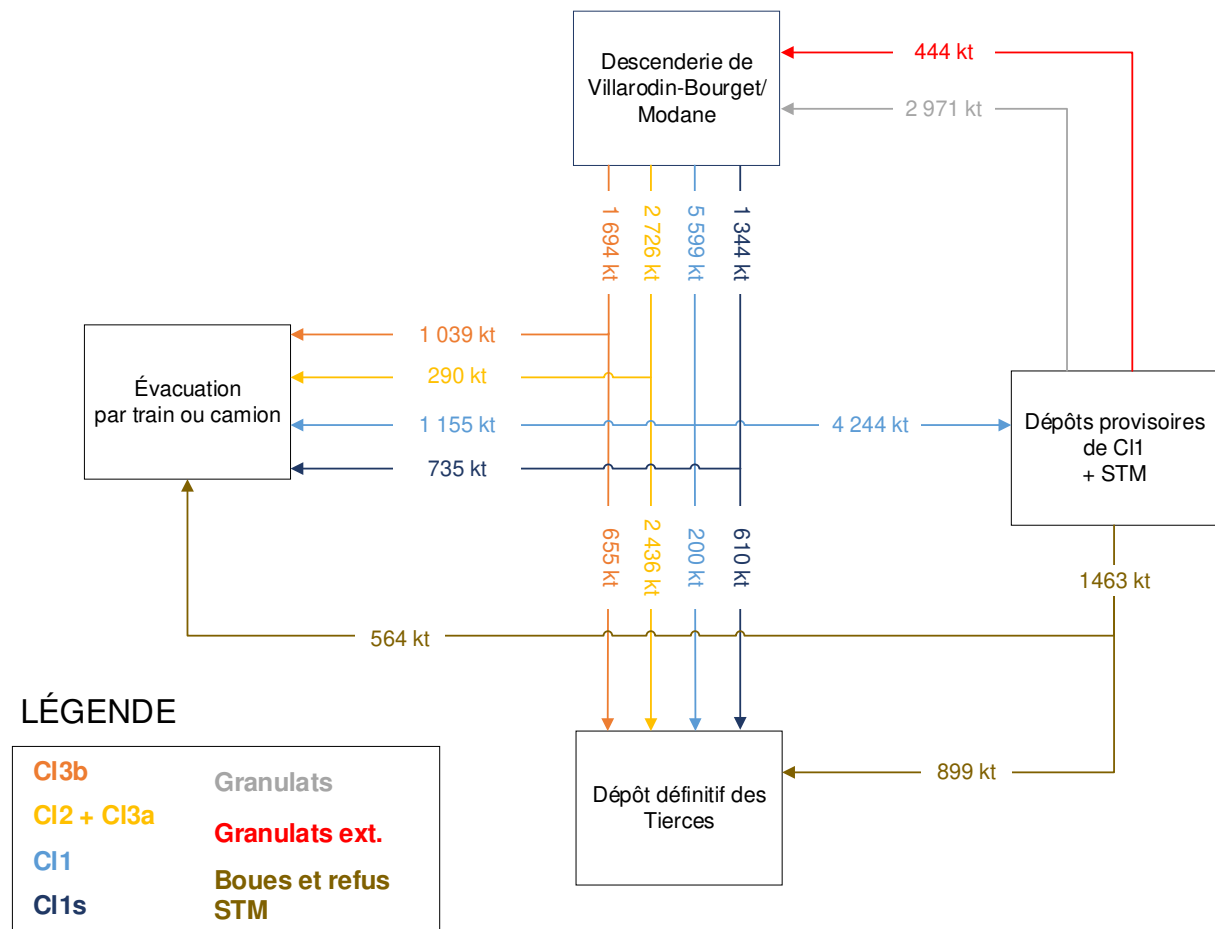


Figure 11. Synoptique des flux de matériaux pour un scénario étudié

4 Références

- Darmendrail, X., Rimey, J., Brino, L., Burdin, J. 2003. Nouvelle liaison Lyon – Turin, une approche d'étude originale pour la valorisation des déblais des tunnels. *Tunnels et Ouvrages Souterrains*, n°176, mars/avril 2003, pp 55-61.
- Gruber L., Böckli O., Spörri D. 2011. Lining installation as excavation continues – Technical and logistical challenges at the Bodio and Faido Sub-sectors of the Gotthard Base Tunnel. *Swiss Tunnel Congress 2011*, pp 38-48.
- Janutolo, M., Seingre G., Bourdon, P. Zampieri, M., Humbert, E., Pline, C. 2019. Logistic management in the longest drives of the Mont Cenis Base Tunnel. *World Tunnel Congress 2019*, pp 3866-3875.
- Hugot, E., Burdin, J., Brino, L., Schriqui, P., Parisi, M.E. 2019. Use and management of sulphated excavation material from the Montcenis Base Tunnel. *World Tunnel Congress 2019*, pp 386-395.