

Genèse et réalisation d'un projet d'**assainissement**

L'un des piliers essentiels de la gestion d'un réseau d'infrastructure comme celui des CFF est le « maintien de la substance », c'est-à-dire la conservation dans un état irréprochable de la disponibilité du réseau existant et de la sécurité de son exploitation. Pour un projet d'assainissement tel que celui actuellement en cours pour les tunnels du Mormont, le maître de l'ouvrage se doit d'établir, à l'amont de l'étude, une stratégie globale d'assainissement continu et de maintenance des ouvrages-types.

A l'heure actuelle, le réseau CFF en Suisse romande comprend 101 tunnels à simple ou double-voie, représentant 85 km de tracé en souterrain. L'âge d'environ 80% d'entre eux dépasse largement le siècle, ce qui constitue donc souvent déjà une bonne raison pour engager des travaux d'assainissement. Depuis dix ans, afin de fixer des priorités, les CFF ont toutefois développé des concepts d'assainissement de l'ensemble des tunnels qui ne dépendent pas seulement de l'âge des ouvrages. Ils doivent notamment tenir compte des divers facteurs suivants, qui influencent la durée de vie restante des tunnels ferroviaires :

- le nombre et l'ampleur d'autres travaux d'adaptation ou d'assainissement antérieurs déjà réalisés ;
- la situation : sur une ligne principale, secondaire, susceptible d'être désaffectée ou, au contraire, développée avec des exigences croissantes ;
- le standard choisi au temps de la construction, qui n'est de loin pas uniforme quant aux dimensions, aux matériaux, aux méthodes de construction et d'étanchement ;
- les conditions environnementales (température, géologie, hydrogéologie) et d'exploitation (charge ferroviaire, vitesse de ligne).

Un service centralisé à Berne, appartenant à la division Infrastructure, est responsable du management des installations et, notamment, des tunnels. Il développe et suit ces concepts d'assainissement, lesquels répondent sans surprise aux noms de « Tunnelkonzept I » et « Tunnelkonzept II ».

La mise au point de ces concepts s'articule en deux phases principales :

- analyser précisément l'état réel des ouvrages, et en prévoir l'évolution, à cette fin, des inspections quinquennales ont systématiquement lieu dans chaque ouvrage ;
- définir un cadre financier et assurer les ressources nécessaires, ce qui nécessite l'aval du conseil d'administration.

Dès le moment où une liste d'ouvrages à assainir en priorité est arrêtée (ce fut le cas en 1998 pour le premier concept), ce service de management des installations mandate le service de management de projet, qui se répartit en quatre régions sur l'ensemble du réseau CFF.

Le management de projet est dès lors tenu de mener des études de variantes, d'en définir la meilleure, de la faire approuver auprès de la direction CFF et de l'autorité de surveillance (Office fédéral des transports), puis de la réaliser.



Fig. 1 : Vue aérienne d'Eclépens avec implantation des tunnels du Mormont

Fig. 2 : Vue depuis le portail sud de la gare d'Eclépens

Avec les tunnels de Sierre, dont les études du projet d'assainissement vont se poursuivre dès cet automne, les tunnels du Mormont constituent les derniers ouvrages de Suisse romande appartenant à la liste du Tunnelkonzept I.

Contexte global

Les tunnels du Mormont sont situés sur la ligne CFF 210 Daillens sud - Biemme, entre la gare d'Eclépens et la halte de Bavois en Suisse. A la sortie d'Eclépens, se succèdent le tunnel sud, de 304m, et le tunnel nord, de 183 m, séparés par un tronçon de 109 m à ciel ouvert situé à Entreroches. Ces deux tunnels ont été construits entre 1853 et 1855 ; ce sont les deux plus anciens tunnels du réseau CFF. Les tunnels existants présentent les défauts structurels suivants :

- le profil d'espace libre permet la circulation à double voie, mais il est insuffisant par rapport aux normes actuelles. De plus, les voitures à deux étages ne peuvent s'y engager ;
- le revêtement des tunnels présente des dommages : la maçonnerie est discontinue, du béton projeté se décolle et se fissure, l'eau s'infiltré à travers la maçonnerie et pose des problèmes en hiver avec la formation de glace, l'extrados présente des vides ;
- la voûte du tunnel sud est déformée sur 40 m ;
- l'épaisseur du ballast sous les voies est insuffisante, localement inférieure à 30 cm ;
- l'évacuation des eaux est assurée par un drainage central, dont la position entre les deux voies représente un lourd inconvénient vis-à-vis de l'exploitation lors des travaux d'entretien.

La configuration géométrique du tracé n'est pas non plus idéale : le faible rayon de courbure entre les deux tunnels impose un ralentissement des trains à 120 km/h – creux de

vitesse –, et il est quasiment impossible d'abaisser le profil en long du tracé sur l'ensemble des tunnels, à cause de la proximité immédiate de la gare et le passage au-dessus d'une route cantonale à Eclépens – au sud du tunnel sud – et d'une autre du côté de Bavois.

Du point de vue de l'exploitation du réseau, les ouvrages du Mormont touchent l'une des deux lignes principales du plateau, celle notamment destinée à assurer la majeure partie du trafic de fret. Il est alors difficile de suspendre la circulation sur l'une des deux voies durant plus de cinq heures consécutives – cela seulement dès le milieu de la nuit –, sinon en le prévoyant au moins une année à l'avance, au moment de définir l'horaire officiel. Il est *a fortiori* encore plus délicat d'obtenir des « intervalles » sur les deux voies en même temps.

De plus, en gare d'Eclépens, deux voies de raccordement desservent des installations industrielles : la cimenterie Holcim – à très fort trafic journalier – et un dépôt d'hydrocarbure du groupe Total, dont l'approvisionnement n'est assuré que par le rail. D'éventuelles restrictions d'exploitation de et vers ces industries doivent naturellement être convenues préalablement avec les partenaires concernés. Les contraintes liées à l'environnement naturel du projet sont également sensibles (voir article p. 21), et une étude d'impact préliminaire a représenté une étape complémentaire du projet avant la phase d'approbation des plans. Enfin, à l'instar de tous les projets touchant les infrastructures ferroviaires en service, les problèmes de sécurité du chantier sont accrus par les dangers spécifiques pour les ouvriers : ils sont dus à la circulation des trains et à la présence de lignes électriques aériennes (lignes de contact et lignes de transport à 15 KV).

Etude de variantes

Déoulant du contexte décrit ci-dessus, le projet doit permettre d'atteindre les objectifs suivants :

- assainir les deux tunnels existants ;
- adapter les deux ouvrages au profil d'espace libre PEL OCF 4/S3. La hauteur entre le PDR et la ligne de contact est fixée à 540 cm (y compris 12 cm pour les relevages consécutifs aux bourrages ultérieurs). La hauteur libre minimale sous calotte est fixée à 575 cm sur une largeur de 80 cm ;
- corriger la géométrie des voies pour supprimer le creux de vitesse entre les deux tunnels. La vitesse sera augmentée de 20 km/h sur ce tronçon, passant ainsi de 120 km/h à 140 km/h (catégorie R) ;
- améliorer les conditions de sécurité en cas d'événement majeur selon les nouvelles normes en vigueur et faciliter les conditions d'entretien.



2



3

Les sept variantes suivantes sont envisagées dans un premier temps :

- variante 1 : « deux tunnels », avec un nouveau tunnel à simple voie, le maintien des deux voies pendant la durée des travaux ;
- variante 2 : « galerie couverte », réalisation à ciel ouvert avec démolition de l'ouvrage existant en maintenant une voie en service (type St-Blaise) ;
- variante 3 : « élargissement par demi-section », assainissement de l'ouvrage par moitié avec mise hors service d'une voie, puis de l'autre, sans modification du profil en long (type Vauseyon) ;
- variante 4 : « tunnel protection, une voie », mise en place d'une voie unique au centre de l'ouvrage existant dans un tunnel de protection et assainissement et agrandissement de l'ouvrage autour de la voie en service ;
- variante 5 : « tunnel protection, deux voies », mise en place d'un blindage de protection sur tout le périmètre du tunnel existant, maintien des deux voies pendant les travaux et assainissement et agrandissement autour ;
- variante 6 : « abaissement radier », abaissement du niveau des voies avec une voie mise hors service puis l'autre. Pas

de modification de la géométrie possible (type Grandvaux-Cornalaz) ;

- variante 7 : « élargissement asymétrique », élargissement de l'ouvrage sur un seul côté avec abaissement du niveau des voies. Une voie mise hors service, puis l'autre.

Des sous-variantes étaient possibles, ainsi que la combinaison de variantes, (solutions différentes pour les deux ouvrages). L'étude de variantes est menée entre novembre 2002 et mars 2003, en intégrant autant les critères liés à la technique de construction (génie civil et génie ferroviaire) que les considérations de la sécurité, la protection de l'environnement, les incidences sur l'exploitation et naturellement les coûts.

Le choix de ces critères – ainsi que leur nombre – s'avère être très délicat et constitue le point d'achoppement de cette phase du projet. En l'occurrence, 13 services spécialisés dans divers domaines CFF se joignent au bureau d'ingénieurs civils auteur du projet pour y apporter chacun sa sensibilité spécifique. Il en ressort la répartition suivante, pour un total de 15 critères :

- quatre critères relatifs aux aspects constructifs (en phase de construction ou en vue de l'entretien ultérieur) ;
- trois critères relatifs à la sécurité du chantier ou de l'exploitation ;

Tab. A : Tableau récapitulatif des 15 critères impliqués dans l'analyse des variantes possibles du projet, jugées selon un barème à cinq niveaux de valeur

Critères		Techniques de construction		Durée de vie, coût d'entretien	Sécurité du chantier	Sécurité de l'exploitation (phase travaux)	Sécurité de l'exploitation	Coûts	Délais	Réserves pour développements futurs	Aspects techniques génie ferroviaire		Mesures d'exploitation (trafic ferroviaire)	Mesures d'exploitation (desserte gare d'Eclépens)	Mesures d'exploitation (accès Holcim + trafic ferroviaire)	Environnement	Environnement	TOTAL	
		1	2								9a	9b							10
											IS	LC + Voie + câbles							
Variante 1	2 tunnels	++	+	++	+	++	+	++	++	++	+	+	++	+	+	-	-	17	+
Variante 2	galerie couverte	++	++	+	+	+	--	++	++	++	0	+	+	0	0	--	--	7	+
Variante 3	élargissement type Vauseyvon	+	0	-	0	0	-	0	0	0	0	0	-	0	-	0	0	-3	
Variante 4	tunnel de protection, 1 voie	-	0	--	-	0	-	0	0	0	+	--	--	-	-	0	0	-10	
Variante 5	tunnel de protection, 2 voies	0	++	--	--	+	--	--	++	++	0	-	0	+	0	-	-	-5	
Variante 6	abaissement radier	+	--	-	--	--	++	++	--	--	0	--	--	--	--	0	0	-12	
Variante 7	élargissement asymétrique	+	-	-	-	-	+	+	-	-	0	-	-	-	-	0	0	-6	

A

- deux critères pour les coûts et délais de réalisation ;
- un critère relatif aux réserves pour des développements futurs ;
- trois critères relatifs aux incidences sur l'exploitation, en phase de chantier ou d'utilisation ;
- deux critères relatifs aux incidences sur l'environnement, en phase de chantier ou d'utilisation.

Chacun de ces 15 critères est jugé selon un barème à cinq niveaux de valeur, et tous ont un poids équivalent dans l'analyse finale de l'étude, dont le tableau récapitulatif est donné ci-dessus (tab. A).

Au-delà cette notation chiffrée, qui délivre une hiérarchie des variantes globalement les plus intéressantes, il est d'emblée admis que la variante 2, réalisée en tranchée ouverte, n'est en réalité pas défendable, tellement son impact est grand du point de vue de la protection de l'environnement : elle est écartée à ce stade des études malgré son score largement positif.

Dans un deuxième temps, l'étude de variante se concentre alors sur les trois variantes 1, 3 et 5 dont les schémas sont représentés ci-contre (fig. 4).

Variante retenue

Au terme de la phase d'étude, c'est la variante « nouveaux tunnels simple voie » qui a été retenue. Elle prévoit :

- le dédoublement du tracé sur environ 1200 m de longueur par la réalisation de deux tunnels de respectivement 326 et 200 m de longueur. La hauteur entre le PDR (plan de roulement) et la ligne de contact LC est fixée à 542 cm. La section transversale libre des tunnels est de 41 m² ;
- l'assainissement des tunnels existants, tout en maintenant le trafic de marchandise Holcim sur l'une des deux voies dans le tube sud, à vitesse réduite. Cette contrainte impose l'exécution des travaux par demi-section dans le tube sud. Le reste du trafic est déplacé sur le nouveau tracé. L'assainissement consiste à remettre en état la voûte, à reprendre le fond afin de garantir un minimum de 40 cm d'épaisseur de ballast sous traverses et à réaliser un nouveau système de drainage du massif et des voies ;
- la correction de la géométrie des voies pour permettre le passage des trains à une vitesse de 140 km/h pour les convois de catégorie R et pour éliminer le creux de vitesse entre les deux tunnels dû à un rayon de courbure insuffisant.

Fig. 4 : Représentation graphique des variantes 1, 3 et 5
 Fig. 5 : Haveuse, chargeuse et voie de chargement sur wagons

Géologie

Les tunnels du Mormont interceptent deux formations géologiques principales de la période du Crétacé inférieur, soit l'Hauterivien et le Barrémien inférieur. Il s'agit essentiellement de calcaires oolithiques, échinodermiques, spathiques, entrecoupés d'interlits marneux.

Les couches forment un anticlinal évasé, peu prononcé, d'axe d'orientation est-ouest. Les strates montrent un plongement faible de 10 à 20° maximum vers le nord ou le sud.

De telles formations rocheuses présentent de fréquentes cavités d'érosion de type karstique, souvent remplies par des dépôts marneux, limoneux ou argileux (sidérolithiques).

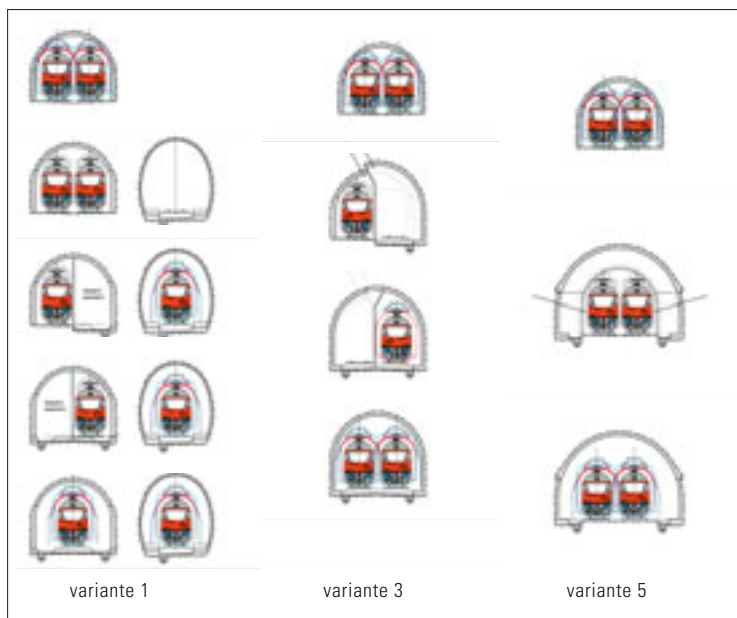
D'un point de vue tectonique, le massif calcaire est passablement fracturé. En effet, il est parcouru, d'une part, par des accidents majeurs qui se présentent sous forme de failles sub-verticales, transverses (décrochantes). Ces zones de faiblesse sont probablement à l'origine de gorges d'érosion préglaciaires, comme celle interceptée par le tunnel sud, comblées par la suite de terrains morainiques. D'autre part, le rocher est fortement compartimenté par des réseaux de diaclases.

Le tunnel sud intercepte une gorge d'érosion préglaciaire, comblée de matériaux principalement morainiques de nature sablo-limoneuse peu argileuse à gravier et blocs, en général de grande compacité, entrecoupés d'épisodes de dépôts limoneux (glacio-lacustre), sablo-graveleux (fluvioglaciaire), moins cohésifs. Dans cette zone, un pré-soutènement constitué de voûtes parapluie sera nécessaire pour assurer la sécurité lors de l'avancement.

Nouveaux tunnels

Compte tenu de la proximité des tracés des axes des tunnels existants et futurs, l'excavation se fait au moyen d'une haveuse Eickhoff ET 410 de 450 kW et d'une pelle tunnel Liebherr 944 de 44 tonnes équipée d'un brise roche hydraulique basse fréquence de 2 500 kg. En terrain meuble dans le tunnel sud, l'avancement se déroule à l'abri de voûtes parapluies et le soutènement est composé de cintres avec remplissage en béton projeté.

Lorsque le rocher ne présente pas ou peu de fissures, il est prévu comme soutènement une couche de béton projeté fibré de 8 à 10 cm d'épaisseur. Dans les zones de rocher fracturé, il est prévu de réaliser un clouage du massif en calotte combiné avec une couche de béton projeté de 10 à 15 cm d'épaisseur. Le nombre et la longueur des clous sont déterminés en fonction de la qualité du massif rocheux, du nombre et de l'orientation des fissures observées lors de l'avancement ; environ quatre à huit clous de 4 m de longueur sont mis en place à chaque mètre linéaire du tunnel.



Les exigences du maître d'ouvrage en matière d'étanchéité correspondent à la classe d'étanchéité 2 au sens de la norme SIA 197¹. Les égouttures au-dessus des installations CFF ne sont pas tolérées. Pour satisfaire à ces exigences, les venues d'eau interceptées lors de l'excavation sont captées à l'aide de demi-coquilles ponctuelles et de nattes de drainage (type Delta MS) placées selon un espacement régulier et raccordées aux drainages latéraux. Ces drainages latéraux sont raccordés au système de drainage central qui permet de récolter ainsi l'eau du massif, ainsi que celle du ballast, dans

¹ A savoir : « sec à légèrement humide. Les taches d'humidité isolées sont tolérées, mais les égouttures à l'intrados de l'ouvrage ne le sont pas. »



un système de récolte des eaux unitaires. De plus, une étanchéité (type Masterseal) sera projetée sur le soutènement de la voûte afin de garantir qu'il n'y ait pas d'égouttures au-dessus des installations CFF. Cette étanchéité sera appliquée en calotte sur le périmètre de la voûte sur un angle d'environ 150°, soit 75° de chaque côté de l'axe du tunnel, après une couche d'égalisation de béton projeté 0-4 mm.

Dans le projet initial, le revêtement définitif mis en place sur le soutènement devait avoir une épaisseur de 10 cm et comprenait une couche de béton projeté fibré de 7 cm et une couche de béton projeté non fibré de 3 cm.

Le remplacement des fibres métalliques par des fibres polypropylènes (voir encadré ci-contre et figures 7 et 8 en p. 18) conduit à réaliser un revêtement définitif d'une seule couche de 8 cm de béton projeté fibré, étanché à l'eau et résistant au gel. Des niches de sécurité, uniquement du côté Alpes où le cheminement de service aura lieu, seront réalisées.

Les matériaux d'exécution sont chargés sur des wagons au portail nord du tunnel nord et acheminés chez Holcim pour être intégrés dans la chaîne de production du ciment.

Tunnels existants

Les deux tunnels existants ne nécessitent pas d'augmentation de gabarit, puisqu'ils n'accueilleront plus qu'une seule voie déplacée en leur centre. Cependant, les revêtements actuels des tunnels présentent de nombreuses dégradations. La maçonnerie s'est dégradée avec le temps et présente des fissures. Les surfaces de béton projeté sont également fissurées et se décollent, ce qui se traduit parfois par des chutes de morceaux sur les voies. Enfin, des gouttières d'eau à travers la maçonnerie posent des problèmes en hiver avec la formation de glace.

De manière à renforcer la maçonnerie et supprimer les gouttières, il est prévu d'assainir le revêtement systématiquement de la manière suivante :

- enlèvement de l'ancien béton projeté décollé et assainissement de la surface par lavage haute pression ;
- forage de décharge sur la voûte (diamètre 3 cm) ;
- pose de coquilles et de bandes drainantes selon une trame régulière et à l'endroit des venues d'eau de manière à évacuer les eaux à la base des piédroits ;
- mise en place d'une couche d'égalisation de gunité à faible



6

- granulométrie de 3 cm d'épaisseur minimale;
- mise en place d'une couche d'étanchéité (type Masterseal) sur la calotte;
- mise en place d'un treillis d'armature et projection de béton projeté de 9 cm d'épaisseur moyenne, étanche à l'eau et résistant au gel.

Béton projeté fibré avec macro-fibres de polypropylène

Les tunnels du Mormont sont les premiers tunnels suisses utilisant des macro-fibres de polypropylène en lieu et place de traditionnelles fibres métalliques pour renforcer le béton projeté de soutènement et de revêtement.

Cette alternative apporte une économie importante par la suppression d'une couche de béton projeté non-fibré contre la corrosion des fibres métalliques. A cela s'ajoute également une amélioration de la qualité de l'ouvrage par la réduction de la structure mille-feuille du revêtement en béton projeté des tunnels puisque la fine couche de béton projeté de 3 cm contre la corrosion des fibres métalliques n'est plus nécessaire. Enfin, le dernier argument était de promouvoir ce

produit novateur qui a fait ses preuves au-delà des frontières suisses et, aussi, de satisfaire le goût pour l'innovation des intervenants du chantier.

Cette solution a nécessité l'élaboration d'un protocole expérimental et un ensemble complet d'essais de projection avant le début des travaux, pour vérifier que les exigences fixées par l'auteur du projet pour le béton projeté seront satisfaites.

Quatre formules de bétons projetés fibrés ont été testées lors du gunitage du portail nord du tunnel nord, une formule traditionnelle avec des fibres métalliques a été comparée avec trois formules avec des fibres de polypropylènes. Les essais ont consisté en de classiques essais sur le béton frais (affaissement au cône d'Abrahams, mesure de la densité et de l'air occlus, détermination du rapport eau / ciment...) mais aussi de nombreux essais réalisés sur du béton projeté durcis, notamment :

- le développement de la résistance au jeune âge au pénétromètre portable pour valider la classe de résistance J2;
- la résistance à la compression sur carottes à 3 jours, 7 jours, 28 jours et 90 jours pour garantir l'obtention d'un béton C25/35;
- la porosité à 28 jours;
- la résistance à la traction par essai brésilien et la résistance à la flexion par essai EFNARC à 28 jours pour comparer l'apport des macro-fibres de polypropylène avec celui des fibres métalliques.

Au terme de ces essais, une formule a été retenue et après quelques ajustements sur chantier, la recette choisie a été validée pour les 5 500 m³ de béton projeté nécessaires dans le cadre de l'assainissement et reconstruction des tunnels de Mormont.

Après un an d'utilisation et la poursuite de contrôles mensuels des paramètres du béton projeté, l'emploi des macro-fibres polypropylènes présente, dans le cas concret des tunnels du Mormont, les avantages suivants :

- une réduction sensible du rebond de la fibre et des agrégats qui donne une structure moins grenue au béton projeté durci, mais qui présente un aspect « poilu », du fait des fibres de polypropylène dépassant de la structure durcie;
- des propriétés remarquables à la flexion sur plaque, avec des valeurs d'absorption en moyennes supérieures ou égales à 800 J contre les 600 J couramment demandées;
- des propriétés post-ruptures intéressantes, donnant au béton un meilleur comportement après le développement de fissures. Les explications semblent *a priori* venir du fait de la longueur des fibres, de la meilleure adhérence de la matrice cimentaire sur les fibres (le faible diamètre de celles-ci augmente considérablement la surface spécifique du

Béton projeté fibré

Les exigences fixées par l'auteur du projet pour le béton projeté pour les nouveaux ouvrages et l'assainissement des ouvrages existants sont :

- Classe de résistance : C25/30
- Classe d'exposition : XC4
- Classe de chlorures : CL0.1
- Classe de résistance à jeune âge : J2
- Dosage en fibre métallique > 35 kg/m³ en place : EFNARC Energie moyenne > 600 J.

Préalablement au démarrage des travaux souterrains, quatre formules de bétons projetés fibrés ont été testé pour le gunitage du Portail Nord du Tunnel Nord, une formule traditionnelle avec des fibres métalliques et trois formules avec des fibres de polypropylènes (Tab. B).

Pour chacune de ces formules, 3 m³ de béton ont été projetés et les essais suivants ont été réalisés :

- Essais sur béton frais et suivi rhéologique sur 3 h;
- Teneur en fibres métalliques;
- Résistance au jeune âge;
- Résistance à la compression sur carottes à 3 j, 28 j et 90 j
- Résistance à la traction par des essais brésiliens à 28 j;
- Energie d'absorption à la flexion selon recommandation EFNARC à 28 j (tab. C).

La formule BP4 a ensuite évolué pour devenir :

- Sable 0/4 : 990 kg/m³
- Agrégat 4/8 : 660 kg/m³
- Ciment CEM II 42.5 : 480 kg/m³
- Eau : 230 kg/m³
- Accélérateur de prise Meyco SA 167 : 5 à 7 %
- Plastifiant Rhéobuild T3 : 1.2 %
- Fibre MEYCO SP 650 : 6 kg/m³

Cette recette est utilisée pour les 5 500 m³ de béton projeté utilisé dans le cadre de l'assainissement et reconstruction des tunnels de Mormont.

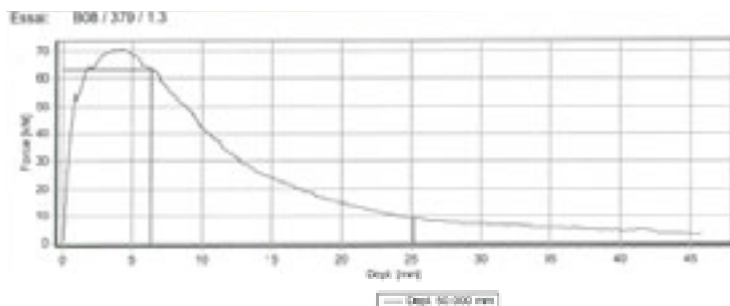
Fig. 7 : Suivi de déformation d'une plaque soumise au test EFNARC – béton projeté avec 40 kg/m³ de fibres métalliques – août 2008

Fig. 8 : Suivi de déformation d'une plaque soumise au test EFNARC – béton projeté avec 6 kg/m³ de macro-fibres de polypropylène – août 2008

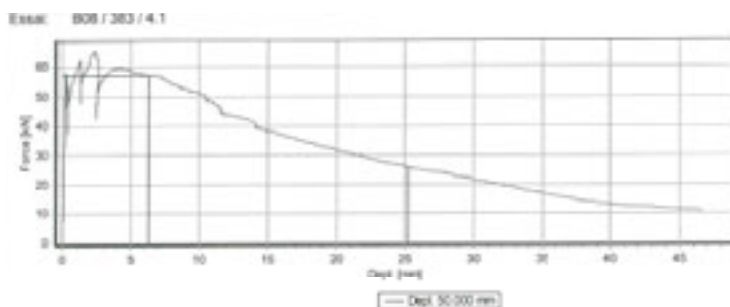
Tab. B : Compositions (mix design) des quatre formules de bétons projetés fibrés

Tab. C : Résultats des tests effectués sur 3m³ de béton projeté

(Sauf mention, tous les documents illustrant cet article ont été fournis par les auteurs.)



7



8

- produit) et de la forte densité du réseau fibré (6 kg/m³ de fibres polypropylènes, soit un nombre très élevé de fibres). Les diagrammes de résistances en fonction de la déformation ci-contre illustrent parfaitement ces propriétés;
- un impact qualitatif indéniable sur la structure par la suppression de l'effet sandwich consistant à projeter une couche de 7 cm de béton projeté fibré métallique et 3 cm non fibrés, remplacé par 8 cm de béton projeté fibré polypropylène;
- une économie importante du fait de la suppression de la couche protectrice en béton projeté non fibré servant à protéger les fibres métalliques;

Les figures 7 et 8 sont révélatrices des propriétés post-ruptures des bétons projetés avec fibres de polypropylène.

Un projet pionnier

Des études d'avant-projet à l'achèvement des travaux, neuf ans se seront écoulés et 48 millions de francs auront été investis dans l'assainissement des tunnels des Mormont. Ce projet public permet non seulement d'améliorer la fluidité d'un axe ferroviaire romand important, mais surtout de mettre en œuvre une toute nouvelle technique, celle du béton projeté fibré avec macro-fibres de polypropylène. Cette dernière, utilisée pour la première fois en Suisse sur ces deux tunnels, permettra la rénovation, l'adaptation et l'optimisation des infrastructures souterraines suisses en minimisant l'impact écologique et en réduisant sensiblement les coûts des travaux.

Olivier Tappy, ing. civil dipl. EPFL
Monod-Piguet + Associés Ingénieurs Conseil S.A.
Avenue de Cour 32, CH – 1007 Lausanne

Martin Schneider, ing. civil dipl. EPFL
Chemins de fer fédéraux suisses CFF
Av. de la Gare 43, CH – 1001 Lausanne

André Racloz, ing. civil dipl. EPFL
CSD Ingénieurs Conseils S.A.
Chemin de Montelly 78, CH – 1000 Lausanne 20

Gilles Lequertier, ing. dipl. Ecole Centrale Paris
Consortium ATM - Infra Tunnel S.A.
Rue de la Gare 15 C, CH – 2074 Marin

MIX DESIGN		BP1	BP2	BP4	BP5
Sable 0/4 lavé	Kg/m ³	990	990	1014	990
Agrégat 4/8	Kg/m ³	660	660	676	660
CEM I 42.5	Kg/m ³	450	450	425	
CEM II 42.5	Kg/m ³	-	-	-	450
Plastifiant RHEOBUILD T3	Kg/m ³	1.2 %	1.2 %	1.2 %	1.2 %
Eau	Kg/m ³	200	200	200	200
Fibres TREFIL FE 66/35	Kg/m ³	45	-	-	-
Fibres PP BASF	Kg/m ³	-	6	6	6
PARAMETRES RHEOLOGIQUES DU BETON FRAIS					
MASSE VOL.	Kg/m ³	2373	2368	2335	2368
RAPPORT E/C MESURE		0.49	0.48	0.50	0.48
AIR OCCLUS	%	2.5	2.1	1.8	2.1
CLASSE DE RESISTANCE					
Conditions remplies		XC4- CL 1.00	XC4-CL 1.00	XC4-CL 1.00	XC4-CL 1.00

B

MIX DESIGN	CLASSE RESISTANCE JEUNE AGE	RC 3 JO Sur carotte (MPa)	RC. 7 JO Sur carotte (MPa)	RC. 28 JO Sur carotte (MPa)	POINCON (JOULES)	R. TRACTION (ESSAI BRESILIEN) (N/MM ²)
EXIGENCE SOUMISSION	J2	N-S	N-S	B 25/30	>500	N-S
BP1	J2	31.3	37.9	44.3	842.8	3.8
BP2	J2	28.4	36.7	40.5	945.0	3.2
BP4	J2	30.3	36.9	39.6	816.2	3.6
BP5	J2	27.7	33.8	36.3	1015.0	3.6

C