

Tunnel de Base du Montcenis: la caractérisation des matériaux d'excavation en vue d'optimiser leur utilisation au sein du projet, l'expérience de la galerie de La Maddalena

Mont Cenis Base Tunnel: characterization of excavated materials to optimize their use in other areas of the project, the experience from La Maddalena Tunnel

Maria Elena PARISI, *TELT sas, Turin, Italie*

Jacques BURDIN, *TELT sas, Turin, Italie*

Eleonora CESOLINI, *TELT sas, Turin, Italie*

Lorenzo BRINO, *TELT sas, Turin, Italie*

Résumé

TELT, chargée de la conception, aujourd'hui de la réalisation et ensuite de la gestion de La Nouvelle Ligne Ferroviaire Lyon-Turin, a réalisé des études approfondies sur les matériaux d'excavation conformément à sa politique de développement durable. Les études menées, côté italien, ont été réalisées à partir de matériaux issus du creusement de la galerie de reconnaissance de La Maddalena, ouvrage annexe à la ligne ferroviaire Lyon-Turin. Les activités menées sur les Gneiss Albitique du Complexe d'Ambin et sur les Micaschistes de Clarea du Complexe de Clarea ont consisté après criblage des matériaux dans l'installation de traitement, à la réalisation d'essais géotechniques sur les matériaux criblés, d'essais pour la détermination du mélange destiné à la confection des bétons de classe C30/37 et C45/55 et enfin, à la réalisation d'essais sur la qualité des bétons. Les résultats obtenus ont été satisfaisants et ont confirmé les possibilités d'utiliser ces matériaux comme granulats, permettant ainsi d'effacer le déficit en granulats sur le territoire italien supposé au stade Projet Définitif en date de 2011. Bien que les caractéristiques intrinsèques des matériaux soient fondamentales pour définir une utilisation appropriée, la typologie de la roue de coupe du tunnelier, la préparation des granulats afin d'obtenir une forme et une granulométrie conforme aux exigences, la confection du béton selon des formulations spécifiques s'avèrent être des étapes tout aussi importantes pour assurer le respect de la politique d'optimisation de l'utilisation de la ressource naturelle.

Abstract

TELT, the company responsible for the design and now the implementation and future management of the New Lyon-Turin Railway Line has carried out extensive studies on excavation materials, according to its sustainable development policy. The studies on the Italian side aimed to gain further knowledge on how best to use the excavation materials that will be produced when boring the Mont Cenis Base Tunnel and were performed using materials excavated from the La Maddalena exploration adit, a structure that is connected to the Lyon-Turin railway line. After screening the materials in the treatment plant, the work on the Albitic Gneiss of the Ambin Rock Complex and on the Clarea mica schists from the Clarea Rock Complex, involved performing geotechnical tests on the screened materials, tests to determine the mix for class C30/37 and C45/55 concrete and finally tests on the quality of the concretes obtained. Satisfactory results were obtained, showing that they could be used as aggregates and could therefore be used to cancel out the supposed aggregate shortage on the Italian side at the Definitive Project stage in 2011. Although the intrinsic properties of the materials are fundamental in determining an appropriate usage, the type of cutting wheel in the tunnel boring machine (TBM), the preparation of the aggregates to obtain a form and particle size conforming to requirements, and the mixing of concrete according to specific formulas are stages that are just as important in making sure the policy of optimising the use of natural resources is respected and followed.

Tunnel de Base du Montcenis: la caractérisation des matériaux d'excavation en vue d'optimiser leur utilisation au sein du projet, l'expérience de la galerie de La Maddalena

Mont Cenis Base Tunnel: characterization of excavated materials to optimize their use in other areas of the project, the experience from La Maddalena Tunnel

Maria Elena PARISI, *TELT sas, Turin, Italie*

Jacques BURDIN, *TELT sas, Turin, Italie*

Eleonora CESOLINI, *TELT sas, Turin, Italie*

Lorenzo BRINO, *TELT sas, Turin, Italie*

1 Introduction

La quantité de matériaux d'excavation déterminée à l'issue des phases de projet pour la réalisation des ouvrages en Italie et en France est estimée à 37 millions de tonnes. Environ 50% sont prévus d'être utilisés dans les chantiers comme granulats béton et comme matériaux de remblai, alors que 50% seront mis en dépôt, la plupart dans le cadre de réaménagement environnemental de carrières.

Le bilan des matériaux d'excavation réalisé dans le cadre du Projet définitif (PD) de la section transfrontalière de la ligne Turin Lyon réalisé du côté italien en 2012, approuvé par le CIPE avec la délibération 15/2015 et compte tenu de la production et des besoins, avait fait état d'un déficit possible en granulats béton (CI 1) d'environ 970.000 tonnes (soit environ 485.000 m³ en volume équivalent) et d'un excédent possible de matériaux pour remblais (CI 2) d'environ 200.000 tonnes (soit environ 100.000 m³ en volume équivalent). En vue d'optimiser le coefficient de valorisation de ces matériaux et ainsi réduire le déficit en granulats béton, des études poussées ont été conduites.

Avec cet objectif et en utilisant les matériaux d'excavation issus de la réalisation du tunnel exploratoire de la Maddalena, des activités en laboratoire ont été réalisées sur les gneiss aplitiques (AMC) du Complexe d'Ambin et sur les micaschistes de Clarea (CL) du Complexe de Clarea. Ces lithologies sont dominantes sur un quart du Tunnel de Base du pk 41+300 environ, en territoire français, au pk 54+800 en territoire italien. L'excavation de la galerie a eu lieu avec un TBM ouvert, type Main beam, avec un diamètre de la tête de coupe de 6,30 m. Le matériau produit par le TBM a été caractérisé dans l'ensemble par des grains de forme allongée riches en éléments fins.

1.1 Caractérisation des matériaux

Les activités ont consisté en :

- un criblage dans l'installation de traitement des différentes classes granulométriques;
- des essais en laboratoire de type géotechnique sur le matériel criblé;
- des essais pour la définition du mélange pour la confection du béton de classe C30/37 et C45/55;
- la fabrication du béton avec des granulats issus de gneiss et micaschistes;
- des essais sur la qualité du béton.

Le matériel excavé issu de la galerie de la Maddalena et utilisé pour ces essais a été d'environ 80 t pour les gneiss aplitiques (correspondant au tronçon excavé de pk 1+114,3 à pk 1+157,5) et environ 100 t (correspondant au tronçon creusé entre pk 3+784,4 et pk 3+833,9) pour les micaschistes de Clarea.

Avant d'être testé en laboratoire, le matériel a été criblé afin d'obtenir les classes granulométriques suivantes : > 16 mm, 8/16 mm, 4/8 mm et 0/4 mm.

1.2 Le matériel et sa caractérisation

La courbe granulométrique de différents matériels est représentée sur la figure n°1, pour les comparer, les courbes granulométriques de référence relative aux matériaux issus du creusement de

l'aménagement de Pont Ventoux et celle de référence théorique (MIC Prévis) sont reportées. La courbe des matériaux prélevés au pk 5+100 de la galerie de la Maddalena est présentée, afin de représenter la majeure partie du tunnel. Il est cependant précisé que la courbe granulométrique des matériaux du pk 5+100 est relative à un matériel remanié et ne provient pas directement de l'excavation du TBM, puisque l'entreprise a installé un petit concasseur à mâchoires (derrière le bouclier) à partir du pk 4+340 à cause de la présence de gros blocs, de diamètre jusqu'à 500 mm et qui ne pouvaient pas être évacués sans broyage préalable.

La figure 1 montre que la courbe des gneiss est caractérisée par un haut contenu en éléments fins, la courbe des micaschistes « naturels » est très proche de la courbe théorique avec une tendance à représenter une certaine homogénéité du matériau.

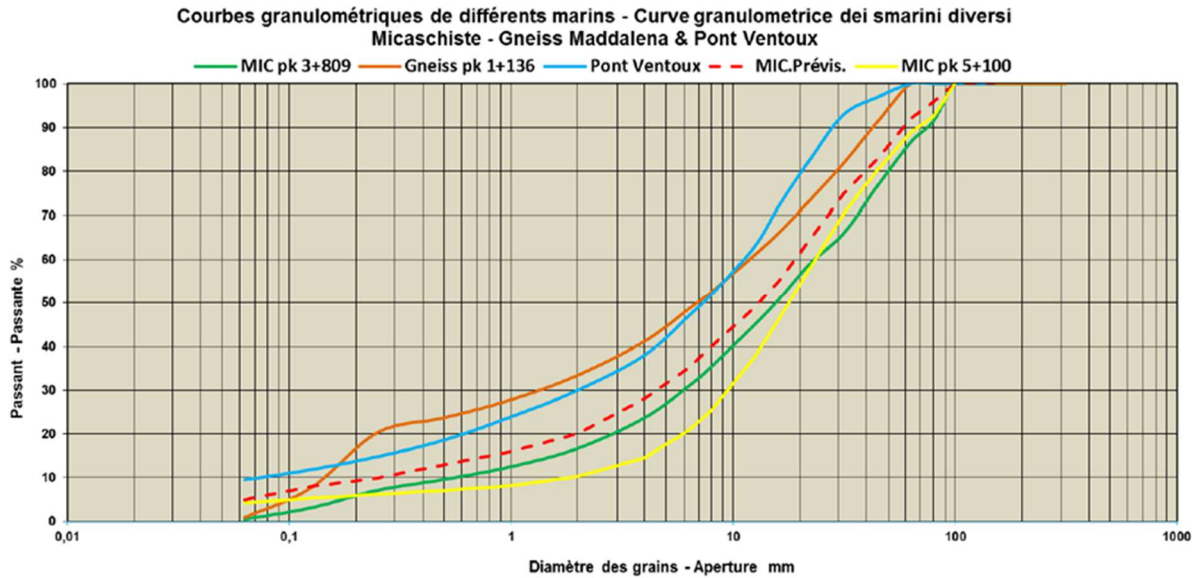


Figure 1. Courbes granulométriques

Les quatre classes granulométriques qui caractérisent les matériaux sont représentées dans le tableau 1.

Tableau 1. Classes granulométriques

	Gneiss		Micaschiste	
	t	%	t	%
0/4 mm	3,7	21,3%	2,8	12,0%
4/8 mm	2,9	16,7%	2,9	12,4%
8/16 mm	3,0	17,2%	2,6	11,2%
> 16 mm	7,8	44,8%	15,0	64,4%
Total	17,4		23,3	

Les essais géotechniques suivants ont été réalisés :

- détermination de la résistance au poinçonnement - Point Load Test (PLT)
- détermination de la résistance à l'usure - Micro Deval;
- détermination de la résistance à la fragmentation -essai Los Angeles;
- réactivité des granulats à l'alcali-réaction (RAG UNI 8250/22);

Les résultats sont synthétisés dans le tableau 2:

Tableau 2. Essais géotechniques

pk de prélèvement	Micacshistes		Gneiss
	pk 3+809	pk 5+100	pk 1+136
PLT \perp (MPa)	4,2	7,42	3,2
PLT // (MPa)	5,9	4,03	3,9
Micro DEVAL (%)	13,2	15,8	-
Los Angeles (%)	19,9	-	39,2
RAG Uni 8250/22 (%)	0,25	0,17	0,09

1.3 Le sable et sa caractérisation

Le sable issu des micacshistes obtenu après criblage, sans lavage préalable et sans criblage approprié, avait une courbe granulométrique non conforme pour la fabrication de béton de bonne qualité. Le pourcentage de fraction $<63 \mu\text{m}$ était trop élevé, le module de finesse (EN 12620, Annexe C) aussi, comme le montre le graphique ci-dessous (0/4 brut). Dans ces conditions, il a donc été décidé de reconstruire en laboratoire une courbe granulométrique acceptable en effectuant trois opérations complémentaires :

- Lavage pour éliminer les fines $< 63\mu\text{m}$;
- Criblage de la fraction 0/4 à 1 mm avec criblage complémentaire pour obtenir deux fractions 0/1 et 1 / 4 et permettre ainsi l'élimination d'une partie de fraction 1/4
- Recomposition des deux fractions obtenues, pour obtenir ainsi un sable (0/4 mm Rec) avec un Module de finesse MF $\leq 3,1$ et un pourcentage de fraction $< 63\mu\text{m}$ acceptable.

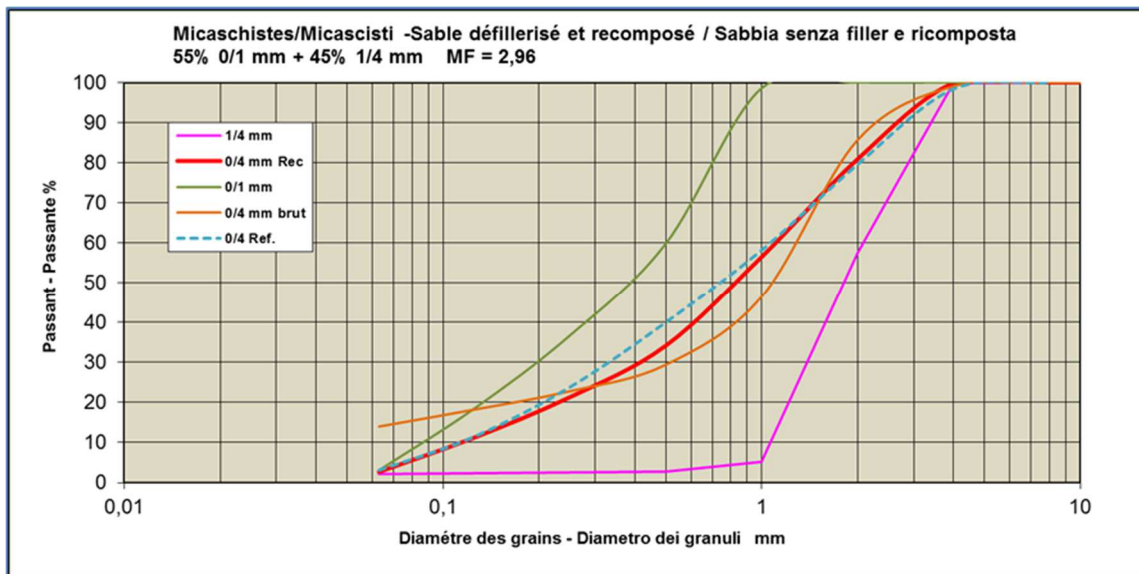


Figure 2. Courbe granulométrique recomposée pour le sable de micacshistes

Le graphique de la figure 2 montre en effet que la courbe de la fraction 0 / 4 mm Rec, c'est-à-dire celle recomposée, a une quantité de fines nettement inférieure au 0 / 4 mm brut.

L'opération réalisée pour les micacshistes a été également effectuée pour le sable des gneiss qui avait une quantité de fines plus élevée que celle des micacshistes, le pourcentage $< 63 \mu\text{m}$ était de l'ordre de 30% (0/4 brut, figure n°3).

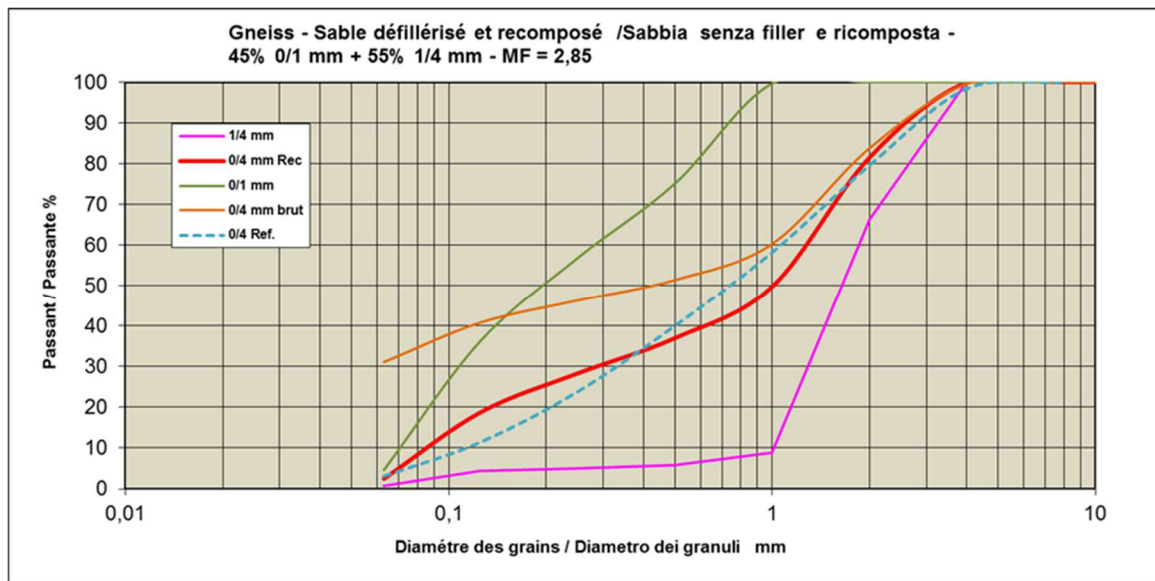


Figure 3. Courbe granulométrique recomposée pour le sable des gneiss

En plus des analyses granulométriques, des essais en laboratoire ont été réalisés dont les résultats ont permis de faire les constatations suivantes :

- b) essai d'absorption d'eau: on a constaté une valeur élevée pour la classe 0/4, celle-ci étant liée à la teneur en éléments fins. Une bonne valeur doit être < 2,5;
- c) indice d'aplatissement : les valeurs ne sont pas très bonnes pour les gneiss tandis que pour les micaschistes elles sont meilleures : le matériau est testé sans traitement, les bonnes valeurs doivent être entre 20 et 30. Dans notre cas, avec ces résultats, le matériau aurait dû recevoir un autre traitement. Le type de concasseur est important, il est dans ce cas plutôt préconisé un « concasseur à axe vertical avec rotor ouvert ».
- d) Los Angeles: valeurs hautes pour les gneiss. Avec cet essai on mesure les fines qui se produisent : des grains aplatis se cassent en formant beaucoup d'éléments fins (ceux sont les valeurs élevées de l'essai) ; plus les grains sont sphériques plus le résultat s'améliore. Les valeurs sont bonnes pour les micaschistes mais pas pour les gneiss. Les valeurs doivent être <35. Le concasseur à axe vertical aurait certainement permis de ramener cette valeur à 25/28.
- e) Abrasivité AFNOR : les valeurs déterminées ont montré que les gneiss sont moins abrasifs que les micaschistes;
- f) Microbar: les micaschistes sont réactifs alors que les gneiss ne le sont pas;
- g) les analyses chimiques : les chlorures, les sulfates et le soufre n'ont pas donné de valeurs supérieures aux limites;
- h) les Point Load Test pour les gneiss avec des essais réalisés parallèle et perpendiculaire à la foliation donnent de bonnes valeurs, donc des roches de bonne qualité; de même pour les micaschistes.

1.4 Composition du béton

Les caractéristiques des constituants utilisés dans la composition du béton ont été:

- granulats : les granulats de micaschistes et de gneiss utilisés pour la confection du béton ont été tamisés une fois arrivés au laboratoire et après avoir fait les analyses granulométriques afin d'éliminer l'excès de fines.
Les classes granulométriques utilisées ont été :
 - 0-4 mm recomposé avec 0-1 et 1-4 (lavé et passé au crible) ;
 - 4-8 et 8-16 mm criblé à sec ;
 - 8-16 mm ;
 - ≥ 16 mm
- Ciment : deux types de ciment ont été utilisés :
 - CEM I 42,5R pour un béton de classe C30/37 (revêtement de galerie, béton projeté...) ;
 - CEM I 52,5R pour un béton de classe C45/55 (voussoirs)

Les cendres volantes de catégorie A avec perte au feu $\leq 5\%$ ont été utilisées dans tous les mélanges

- Adjuvants : adjuvants SIKA avec des propriétés de super plastifiants et fluidifiants, Viscocrete SB.

Trois types de béton ont été fabriqués : un type C30/37 avec des micaschistes, un type C30/37 avec des gneiss et un type C45/55 avec des micaschistes. La courbe granulométrique du béton a été établie conformément aux règles en vigueur avec ce type de granulats avec les granulats criblés et lavés provenant de matériaux d'excavation.

Les composants et leurs pourcentages, pour la composition des mix design, sont donnés dans le tableau suivant (figure n°6) :

Tableau 3. Composition du béton

Composition pour 1 m ³ de béton- Granulats secs								
Composizione per 1 m ³ di calcestruzzo - Aggregati secchi								
		Micaschistes / Micascisti				Gneiss		
		%	C 30/37	%	C 45/55	%	C 30/37	
0/4 mm Recomposé/Ricomposto	kg/m ³	42	727	38	638	41	683	
4/8 mm		18	312	20	336	18	300	
8/16 mm		40	692	42	705	41	683	
Total Granulats / Aggregati			1731		1678		1665	
CEM I 42,5			315				315	
CEM I 52,5					380			
Cendres / Ceneri			85		70		85	
Viscocrete SB			5,00		5,63		5,20	
Eau / Aqua			200		212		220	
E/L _{eq}			0,55		0,50		0,60	

En synthèse:

- Ø max 16 mm ;
- % de sable 0/4 : il peut varier de 38 % (béton préfabriqué) à 46 % (béton auto-plaçant) ;
- Dosage minimal en liant (ciment + cendres) égal à 400 kg/m³ ;
- la composition du béton 45/55 est très différente de celle du béton 30/37, pour obtenir une résistance de 45 N/mm² sur les éprouvettes cylindriques ; il a fallu réduire le pourcentage de sable, augmenter le pourcentage de 8/16 mm, augmenter la quantité de ciment ;
- la composition du béton doit permettre d'obtenir une ouvrabilité très bonne pour une mise en œuvre facile.

1.5 Essais sur béton

Des essais sur les bétons ainsi confectionnés ont été réalisés sur bétons frais et durcis.

Pour les propriétés des bétons frais a été définie:

- la classe de consistance au moyen de l'essai du cône d'Abrams, selon la norme de référence UNI EN 12350-2, qui prévoit les classes suivantes (Tableau 4):

Tableau 4. Essai d'Abrams

Classe de consistance	Étalement au cône d'Abrams (SLUMP) in mm	Description
S1	10-40	humide
S2	50-90	Plastique
S3	100-150	Semi-fluide
S4	160-210	Fluide
S5	≥220	superfluide

Les résultats ont été:

- i) Mélange micaschistes C30/37, étalement 160 mm, classe S4;
- ii) Mélange micaschistes C45/55, étalement 40 mm, classe S1;
- iii) Mélange gneiss C30/37, étalement 75 mm, classe S2.

Le contenu de l'air dans le béton frais a été déterminé par l'essai de pression selon la norme de référence UNI EN 12350-7. Cet essai est effectué afin de vérifier le volume d'air qui a été piégé dans le béton et qui, s'il est supérieur aux valeurs de référence, pourrait affecter la qualité du béton durci.

Les résultats des essais réalisés ont été les suivants :

- i) Mélange micaschistes C30/37, contenu en air 2,25%;
- ii) Mélange micaschistes C45/55, contenu en air 1,70%;
- iii) Mélange gneiss C30/37, contenu en air 1,80%.

Pour les propriétés à l'état de béton durci:

Sur les micashistes C30/37:

- *Résistance à la compression*: à 2 jours, 7 jours, 28 jours, 90 jours. La résistance à la compression augmente régulièrement jusqu'à 90 jours avec ce type de béton, elles passent de 20.9 à 38.4 N/mm²; les valeurs mesurées sont considérées bonnes (Figure 4),



Figure 4. Essai de résistance à la compression sur mix design micaschistes C30/37, rupture.

- *Essai de profondeur de pénétration à l'eau* : les valeurs obtenues à 28 jours puis à 90 jours sont très bonnes, passant de 7,4 mm à 2,6 mm. Les valeurs doivent être < 25mm, pour être bonnes ;
- *Résistance à la traction indirecte*: les valeurs obtenues à 28 jours puis à 90 jours sont bonnes, elles passent de 3,7 N/mm² à 4,7 N/mm². Les valeurs sont < au 10% en comparaison avec la résistance à la compression ;

Sur les micaschistes C45/55 :

- *Résistance à la compression*: les valeurs déterminées à 2 jours et à 7 jours montrent une bonne tendance à l'augmentation, à 28 jours les valeurs sont légèrement diminuées (de peu),

à 90 jours elles recommencent à augmenter, elles passent de 30,0 N/mm² à 57,5 N/mm². Les valeurs théoriques sont de 45 N/mm²

- *Essai de profondeur de pénétration à l'eau* : les valeurs obtenues à 28 jours puis à 90 jours sont très bonnes, passant d'une moyenne de 10 mm à une moyenne de 5 mm ; les valeurs doivent être < 25mm pour être bonnes (Figure 5);



Figure 5. Essai de pénétration à l'eau pour mix design micaschistes C45/55 en cours.

- *Résistance à la traction indirecte*: les valeurs obtenues à 28 jours puis à 90 jours sont légèrement supérieures à 10% en comparaison avec la résistance à la compression, elles peuvent néanmoins être acceptables ;

Sur les gneiss C30/37

- *Résistance à la compression* : les valeurs déterminées à 2 jours, 7 jours, 28 jours et 90 jours ont augmenté peu à peu passant d'une valeur initiale moyenne de 20,9 N/mm² à 44,9 N/mm², les valeurs sont bonnes. Les valeurs théoriques devraient être d'environ 45 N/mm²
- *Essai de profondeur de pénétration à l'eau* : les valeurs obtenues à 28 jours puis à 90 jours sont très bonnes, elles passent d'une moyenne de 9,1 mm à une moyenne de 4,1 mm; les valeurs doivent être < 25mm pour être bonnes ;
- *Résistance à la traction indirecte*: les valeurs obtenues à 28 jours puis à 90 jours sont bonnes, <10% en comparaison avec la résistance à la compression (Figure 6).



Figure 6. Essai de résistance à la traction indirecte, rupture sur mix design gneiss C30/37

Dans le tableau 5, la synthèse des résultats des essais sur le béton frais et le béton durci est présentée.

Tableau 5- Synthèse des résultats

Essais / Prove			Micaschistes / Micascisti		Gneiss	
			C 30/37	C 45/55	C 30/37	
Béton Frais Cls fresco	Slump Test		mm	160	40	75
	Masse volumique / Massa volumica		kg/m ³	2417	2438	2391
	Air entraîné / Aria inglobata		%	2,3	1,7	1,8
Béton durci Cls indurito	Résistance à la compression Resistenza alla compressione	2 J - 2 gg	N/mm ²	20,9	30,0	20,9
		7 j - 7 gg		31,3	39,0	30,5
		28 j - 28 gg		33,9	39,8	38,5
		90 J - 90 gg		38,4	57,5	44,9
	Résistance à la traction / Resistenza alla trazione	28 j - 28 gg	N/mm ²	3,7	4,0	3,4
		90 J - 90 gg		4,7	4,5	3,9
	Pénétration d'eau sous pression - Penetrazione all'aqua sotto pressione	28 j - 28 gg	mm	7,3	10,2	9,1
		90 J - 90 gg		4,1	5,5	4,1
Module Elastique / Modulo Elastico		90 J - 90 gg	N/mm ²	33734	33293	26864

Des essais de Réaction Alkali-Granulats (RAG), selon la norme NF P 18-454, ont été réalisés sur les mélanges avec des granulats issus des micaschistes pour un béton C30/37 et C45/55 et des gneiss pour un béton C30/37.

Les résultats à 20 semaines (qui devraient être suivis pendant 52 semaines) sont encourageants pour les mélanges C30/37 micaschistes et gneiss tandis que pour le mélange C45/55 des micaschistes, les valeurs sont au-delà des limites normatives d'où la nécessité de changer le type de ciment à utiliser.

Pour l'essentiel, les éléments suivant ont été identifiés :

Pour les micaschistes

- Le test "Microbar" a défini les agrégats comme "Potentiellement Réactif - PR". Pour cette raison, il a été décidé d'incorporer des cendres volantes à hauteur de 21% sur le total "CEM I + cendres" pour le béton C30/37.
 - Béton C30/37: les déformations mesurées permettent de dire que la composition testée devrait résister à la RAG. La teneur totale en Na₂O_{Eq} du béton est de 3,66 kg/m³, cette valeur est considérée comme supérieure à la limite supérieure pour ce type de béton.
 - Béton C45/55: les premières déformations mesurées montrent que cette composition n'est pas acceptable. Cette dérive d'une quantité élevée en ciment – 380 kg/m³ – et d'une faible quantité en cendres, seulement 15.5 %. Ces valeurs ont été choisies pour permettre d'atteindre les résistances mécaniques souhaitées, mais ceci conduit à une teneur en Na₂O_{Eq} totale du béton de 4.15 kg/m³, valeur beaucoup trop élevée (les différents règlements recommandent de ne pas dépasser 3.0 kg/m³ pour ce type de béton).

Pour les gneiss

- Le test "MICROBAR" a défini les agrégats comme "non réactif". Afin de limiter l'augmentation de la température du béton et de conserver les mêmes règles de formulation, les quantités de cendres volantes et de liant sont identiques à celles du béton C 30/37 micaschistes. Les résultats après 20 semaines peuvent laisser penser que le béton C30/37 présente un risque de RAG avec les mêmes teneurs en Na₂O_{Eq} totale du béton de 3.66 kg/m³.

Ces premières considérations ne condamnent pas le principe d'utilisation des gneiss et des micaschistes pour les transformer en granulats béton, Il conviendra le moment venu d'utiliser un liant dont la composition permettra d'éliminer de manière certain le risque RAG.

1.6 Les résultats

Sur la qualité des matériaux d'excavation :

- les micaschistes sont des matériaux homogènes et ont des caractéristiques conformes aux exigences pour leur transformation en granulats béton;
- les gneiss présentent certaines caractéristiques avec des valeurs un peu à la limite de l'acceptabilité (essai Los Angeles). Mais un concassage industriel adapté permettra leur bonne transformation pour en faire de bons granulats pour béton C30/37.

Sur le marin:

Les courbes granulométriques des matériaux mettent en évidence une grande variation des teneurs en éléments fins ≤ 4 mm. Cette variation a principalement deux origines : la qualité de la roche excavée et la structure de la tête de coupe de la TBM.

Pour obtenir un coefficient de valorisation le plus élevé possible et réduire la production de fines, le choix du type de tunnelier, le diamètre des molettes et leur espacement deviennent des paramètres indispensables à respecter. Ils permettraient de produire une courbe dont la courbe se situerait en dessous de la courbe "MIC Ref." de la figure 1.

Sur la préparation des granulats :

Les essais ont été réalisés sur des granulats provenant directement du creusement sans concassage adapté et donc sans correction de forme, sans lavage approprié. La difficulté de reconstruire le sable d'une qualité acceptable en est la preuve. D'où la nécessité de prévoir en cours de travaux une unité de concassage/criblage/lavage ayant la capacité de :

- Incorporer en ligne 1 ou 2 concasseurs de type « Impacteur à axe vertical et rotor ouvert » à vitesse variable pour:
 - s'adapter aux variations de la qualité des matériaux;
 - améliorer les coefficients de forme des granulats;
 - produire du sable en pourcentage variable avec un faible pourcentage en éléments $\leq 63 \mu\text{m}$
 - Recycler les classes granulaires qui peuvent être en excédent 2/4, 4/8 et 8/16 mm
- Utiliser une unité de production de sable qui permet de produire :
 - un sable unique 0/4 mm (sans classe intermédiaire 0/1 +1/4 mm notamment)
 - un sable avec une teneur en élément $\leq 63 \mu\text{m} \leq 3 \%$
 - un sable avec un module de finesse "FM" compris entre 2.7 et 3.1 avec une courbe granulométrique proche de la courbe "0/4 Ref." des figures 2 et 3.

Avec des granulats entièrement concassés, la qualité du sable est déterminante pour l'ouvrabilité du béton frais et la durabilité du béton durci.

Sur les coefficients de valorisation:

Les coefficients de valorisation pour les matériaux provenant du Tunnel de Base pourraient être améliorés pour :

- Les micaschistes de Clarea CL: 0.65 à 0.70 (comme sur le chantier de Nant de Drance avec des matériaux de qualité similaire et une unité de production de granulats telle que définie au § 1.7);
- Les gneiss AMC: 0.55 à 0.60 (c'est la production excessive d'éléments fins qui abaisse le coefficient de valorisation par rapport aux micaschistes).

On pourrait ainsi passer d'un coefficient global de 0.55 comme prévu dans le PD/PR, à 0.65 avec une augmentation de production de granulats béton (Cl 1) qui pourrait atteindre environ 1.100.000 t (+450.000 tonnes pour les matériaux excavés en Italie et +650.000 tonnes pour les matériaux excavés en France). Il est rappelé que ces coefficients de valorisation ne tiennent pas compte des éventuels accidents géologiques, failles ou zones perturbées, qui pourraient être rencontrés en cours de creusement du Tunnel de Base.

Ces nouveaux coefficients de valorisation ont été appliqués dans la phase du Projet Définitif de Variante du 2017.

Béton:

Les 3 bétons testés sont conformes à la norme, avec une légère marge de sécurité provenant essentiellement d'une préparation insuffisante des granulats utilisés. Le dosage en liant a été conforme aux usages dans ce domaine, mais le choix du ciment et des additions ainsi que leur pourcentage doit être revu. Tout cela conduira à réduire les valeurs du rapport Eau/Liant qui ont été très élevées lors des essais réalisés.

En prenant en compte les remarques ci-dessus, il sera possible d'obtenir sur le chantier des résistances plus élevées et de produire des bétons avec une marge de sécurité plus élevée.

2 Perspectives

Les travaux effectués ont été satisfaisants, en plus, les résultats obtenus ont permis de revoir l'estimation du matériau d'excavation valorisable en privilégiant le plus noble, le granulats béton. Cependant, la période de test doit continuer, il est nécessaire de reprogrammer une campagne d'essais et de mise au point du béton, en prévoyant, par exemple, l'ajustement de la courbe granulométrique du béton et notamment le pourcentage de sable, approfondir les études pour l'amélioration du coefficient de forme, l'ajustement du dosage pour le liant en vue de l'alcali-réaction et en prévoyant l'optimisation du choix des adjuvants qui permettra d'obtenir l'ouvrabilité recherchée avec un rapport Eau/Liant $E_q \approx 0.50$ pour les bétons C 30/37.

3 Références

- L. Brino, *La Nuova Linea Torino Lione: gli aspetti tecnici di un grande progetto transfrontaliero*, Gallerie e Grandi Opere Sotterranee, giugno 2012, n. 102, pp. 11-15, Pàtron Editore.
- J. Burdin, X. Darmendrail, E. Cesolini, L. Brino, *La raccomandazione del gruppo di lavoro GT 35 dell'AFTES su La gestione e l'impiego dei materiali scavati*, Gallerie e Grandi Opere Sotterranee, settembre 2019, n. 131, pp. 65-67 e Inserto pp. 1-50, Pàtron Editore.
- X. Darmendrail, L. Brino, J. Burdin, *Bilancio e risultati degli studi sulla gestione e valorizzazione dei materiali di scavo del Tunnel di Base della Nuova Linea Torino Lione*, Convegno SIG 2011, Verona, 2-3 marzo 2011, pp. 47-55, Editore SIG srl.
- X. Darmendrail, J. Rimey, L. Brino, J. Burdin, *Nouvelle liaison ferroviaire Lyon-Turin – Une approche d'étude originale pour la valorisation des déblais des tunnels*, Tunnel et Ouvrages Souterrains, mars/avril 2003, n. 176, pp. 55-61.
- NF P 18-454 - Béton - Réactivité d'une formule de béton vis-à-vis de l'alcali-réaction - Essai de performance, décembre 2004.
- M.E. Parisi, L. Brino, A. Chabert, *Il Tunnel di Base del Moncenisio: bilancio del test di scavo con fresa nel Cunicolo Esplorativo de la Maddalena di Chiomonte – L'opera preliminare*, Swiss Tunnel Congress 2018, Lucerna, 13-15 giugno 2018.
- M.E. Parisi, L. Brino, P. Gilli, E. Fornari, G. Martinotti, S. Lo Russo, *La Maddalena exploratory tunnel*, Geomechanics and Tunnelling, Base Tunnels, Vol.10, n.3, giugno 2017, pp. 265-274, Ernst & Sohn Berlin.
- M.E. Parisi, A. Farinetti, P. Gilli, L. Brino, *First results from the excavation of the Lyon-Turin Maddalena exploratory tunnel*, AITES-ITA 2015 World Tunnel Congress, Dubrovnik, 22-28 maggio 2015.
- C. Thalmann, J. Burdin, L. Brino, M. Petitat, *Fabrication de bétons de grande qualité à partir de sable riche en mica – Expérience sur les grands chantiers de construction*, Congrès International AFTES 2014, Lyon, 13-15 octobre 2014.
- C. Thalmann, C. Carron, L. Brino, J. Burdin, *Gestion et valorisation des matériaux d'excavation de tunnels – Analyse comparative de trois grands projets, St. Gotthard, Loetschberg, Maurienne-Ambin*, Congrès International AFTES 2005, Chambéry, 10-12 octobre 2005, pp. 237-248, Edition Spécifique.
- UNI EN 12350-2 Prova su calcestruzzo fresco - Parte 2: Essai di abbassamento al cono, maggio 2009.
- UNI EN 12350-7 Prova sul calcestruzzo fresco - Parte 7: Contenuto d'aria - Metodo per pressione, maggio 2009.