

Tunnels et matériaux d'extraction

L'UTILISATION DE GRANULATS PROVENANT DE LA TRANSFORMATION DES MATÉRIAUX D'EXCAVATION DES TUNNELS POUR LA FABRICATION DES BÉTONS

AGGREGATES FROM TUNNEL EXCAVATION MATERIAL PROCESSING FOR CONCRETE PRODUCTION

BURDIN Jacques
Ingénieur Conseil

1. INTRODUCTION

Les MATériaux d'EXcavation des tunnels – **MATEX** – ont été pendant de nombreuses années mis en dépôt, sans qu'aucune perspective d'emploi n'ait été envisagée. Depuis une vingtaine d'années, les projets de tunnels longs produisant de grandes quantités de MATEX d'une part, et la législation environnementale d'autre part, ont changé la donne et contraignent les acteurs, dans la mesure du pos-

sible, à utiliser les MATEX pour préserver les ressources minérales, réduire les émissions de gaz à effet de serre et réduire l'impact sur l'environnement des zones de mise en dépôt définitif.

La production européenne de MATEX durant ces 20 dernières années peut être estimée à 250 Millions de tonnes pour environ 200 projets, principalement d'infrastructures. Dans un futur proche, les 50 prochaines années, les prévisionnistes avancent des chiffres de l'ordre de 800 Millions

de tonnes en intégrant la nécessité de mettre de plus en plus sous terre les infrastructures et certaines installations industrielles.

Les MATEX deviennent donc une matière première à part entière. Au tout premier rang des utilisations possibles se trouve leur transformation en granulats pour béton.

Cette présentation va donc traiter de ce sujet particulier en évoquant successivement les méthodes d'excavation, les différents types de MATEX produits, la situation actuelle de la technique, quelques opérations de référence, les contraintes de production, la qualité des granulats produits, son incidence sur les bétons et la nécessaire relation avec les documents normatifs.

L'EN 206/CN a permis la création des « Bétons d'ingénierie » qui constitueront incontestablement une aide aux projeteurs et aux constructeurs dans le monde particulier des tunnels qui auront à gérer ces bétons dont certains sont vraiment des « Bétons atypiques ».

2. GESTION ET EMPLOI DES MATÉRIAUX D'EXCAVATION - GEME - ÉTAT DES LIEUX

2.1. État des lieux

La GEME a commencé à obtenir quelques titres de noblesse avec l'apparition des grands projets et notamment la réalisation des traversées alpines suisses-NEAT- avec les tunnels du LÖTSCHBERG et du GOTTHARD [1]. L'autorisation de construire a été donnée à la condition obligatoire d'utiliser les MATEX.

Sous cette impulsion, les acteurs d'autres grands projets, et notamment LTF, ont commencé à intégrer cette discipline dans le montage des documents contractuels.

L'AFTES a dès 2006 produit une Recommandation [2] sur le sujet pour aider Maîtres d'Ouvrages, Bureaux d'Ingénieurs et Entrepreneurs. Une révision de ce document est en cours et une nouvelle édition est programmée fin 2015.

La GEME s'installe progressivement dans les esprits et les projets en Europe, Allemagne (Bössler + Filder), Autriche (Brenner, Koralm, Semmering), UK (Cross Rail), France

(Lyon Turin, Grand Paris), Suisse (Nant de Drance, Veytaux, Linth-Limmern, Grimsel 3).

2.2. Constat

Le constat que l'on peut faire aujourd'hui est le suivant :

- La GEME en roche dure commence à bien fonctionner, des progrès techniques restent encore à faire.
- Pour la GEME en terrains meubles, tout reste à faire.
- La réglementation administrative sur les MATEX manque encore de précision, l'engagement des prescripteurs n'est pas encore suffisant, les obligations des Maîtres d'Ouvrages restent encore mal définies ou mal interprétées.
- La Communauté Européenne veut faire progresser la démarche, encourage et finance des projets de recherche pour industrialiser la GEME tel le projet DRAGON [3].

2.3. Statistiques

Les projets qui ont fait ou qui vont faire l'objet d'une démarche GEME « lourde » font apparaître des bilans très positifs (voir tableau 1 ci-dessous).

3. MÉTHODES DE PRODUCTION DES MATEX TYPES DE MATEX

Pour le sujet concerné, nous ne prendrons en considération que les méthodes de creusement en roche dure :

3.1. Méthode Conventionnelle

Cette méthode d'abattage séquentielle à l'explosif produit un marin 0/600 mm. Il devra souvent être concassé pour être transporté par des convoyeurs à bande de plus en plus utilisés si les distances de transport en souterrain sont longues pour des raisons de sécurité et de pollution pouvant être générée par les moteurs thermiques des engins de transport sur pneus ou sur rails.

Cette méthode est principalement utilisée pour le creusement des ouvrages linéaires en terrain difficile et pour les ouvrages de grandes dimensions.

Projet	Longueur	Excavation	Béton	Granulats	Taux d'utilisation		
		MATEX		Besoins	Production	% du projet	% des MATEX
	[km]	[Mio.t]	[Mio.m ³]	[Mio.t]	[Mio.t]		
Alp Transit Gotthard	2 x 57	28,5	4	8	6,5	81 %	23 %
Alp Transit Loetschberg (1)	2 x 35	16,5	1,9	3,8	3,8	100 %	23 %
Lyon Turin Ferroviaire (2)	2 x 57,3	31	4,7	9,4	9,9	105 %	32 %

(1) Le creusement et le revêtement des 2 tubes n'ont été que partiellement réalisés.

(2) Les études sont en cours de finalisation, les chiffres de ce tableau doivent être corrigés.

Tableau n° 1 : Comparaison de la démarche GEME entre 3 tunnels longs et profonds [5].



Photo n° 1 : Jumbo de foration.



Photo n° 2 : Concasseur en galerie.

3.2. Creusement Mécanisé

Il existe principalement 2 types de tunnelier pour notre sujet :

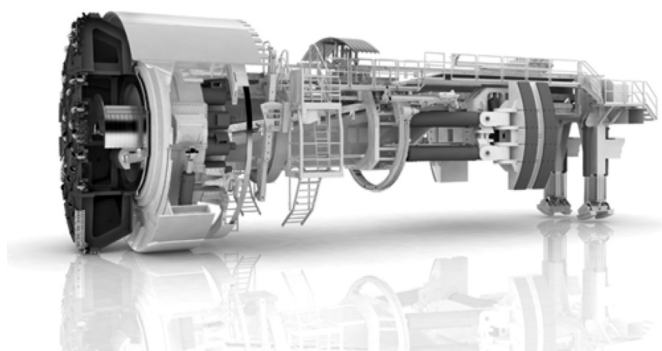


Photo n° 3 : Gripper TBM « ouvert » (HK).

TBM « Ouvert » utilisé dans les roches dures homogènes ne présentant pas de caractéristiques difficiles. La machine s'appuie sur la roche grâce à des patins. Cette méthode de creusement continu prévoit généralement l'application d'un revêtement de sécurité en béton projeté derrière la tête de foration.

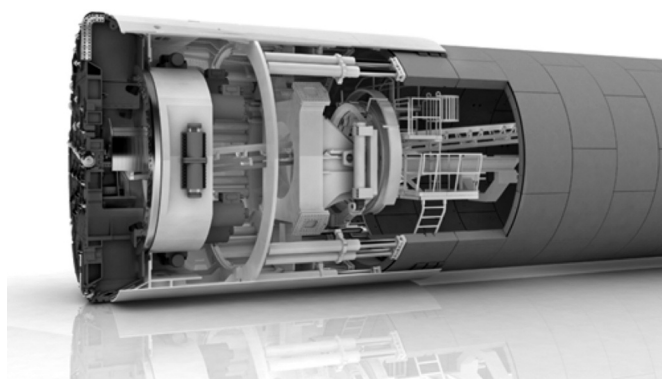


Photo n° 4 : EPB TBM « Fermé » (HK).

TBM « Fermé » dit « A pression de terre » (Earth Pressure Balanced – EPB) utilisé dans les roches dures susceptibles

de produire des déformations différées et/ou dans les terrains de dureté moyenne. Le creusement se fait sous la protection d'un bouclier. Le revêtement du tunnel est réalisé immédiatement derrière le bouclier avec des voussoirs généralement en béton sur lesquels s'appuie la tête de coupe pour avancer.

3.3. Statistiques

Il est important de noter que la tendance actuelle des méthodes de creusement va vers le creusement mécanisé pour 80 % des ouvrages linéaires ; environ 80 % de ces ouvrages sont réalisés dans des terrains meubles qui ne sont pas pour le moment encore concernés par la transformation et l'utilisation ultérieure des MATEX.

4. MÉTHODES DE TRAITEMENT

4.1. Courbes granulométriques des MATEX

À l'instar des matériaux extraits en carrière, la méthode d'extraction influence la qualité des MATEX :

- MATEX de TBM :

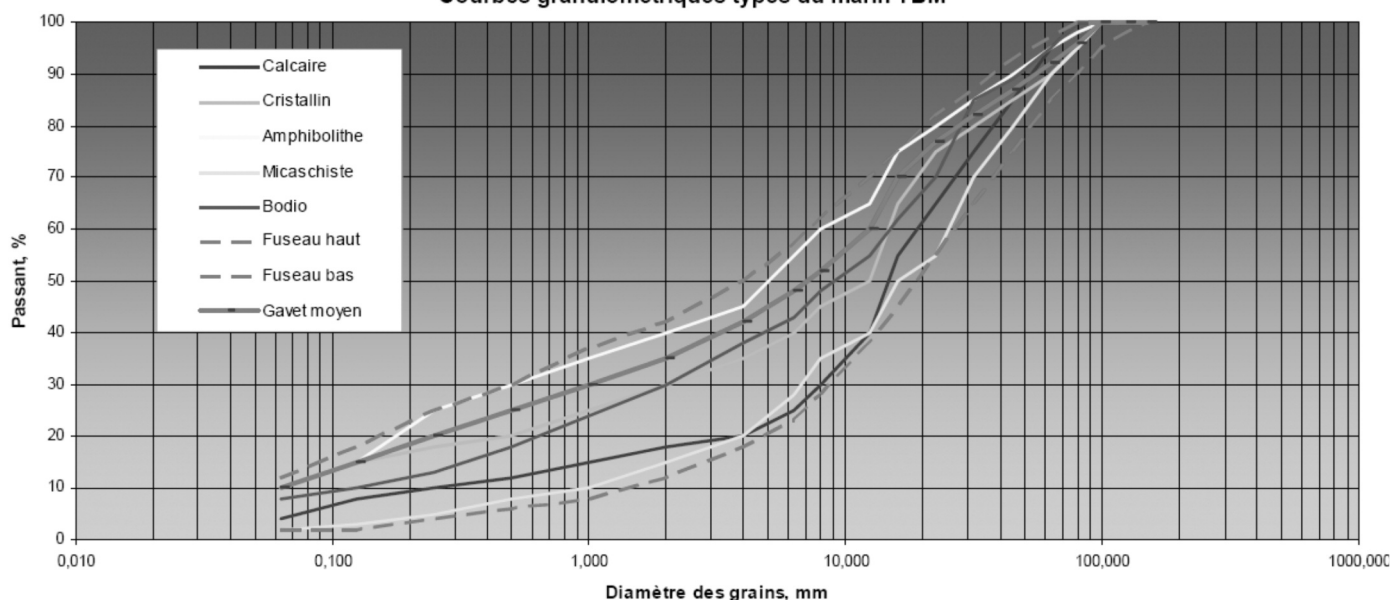
- D Max de l'ordre de 100/150 mm
- Pourcentage de fines plus élevé, plus la roche est dure plus le pourcentage est élevé
- Coefficient de forme des matériaux moyen à mauvais.

NB : l'augmentation du diamètre des outils de coupe et de leur espacement sur la tête ont tendance à faire augmenter le D Max.

- MATEX Conventionnel :

- L'abattage à l'explosif produit un MATEX 0/600 mm
- Ce matériau est en général concassé avec un matériel adapté, concasseur à mâchoires, concasseur à double arbres dentés ou concasseur à percussion.

Courbes granulométriques types du marin TBM



Graphique n° 1 : Quelques courbes de MATEX TBM.



Photo n° 5 : MATEX de granite.



Photo n° 6 : Stock de MATEX concassé.

4.2. Traitement à sec

Si le MATEX est homogène, de très bonne qualité, de bonne origine pétrographique, calcaire ou granite par exemple, un simple criblage à sec peut permettre d'extraire la ou les classes granulaires dont on a besoin.

4.3. Traitement sous eau

C'est le cas général pour obtenir des granulats correctement concassés et correctement classés et lavés.

Une grande attention doit être en général portée sur le choix des concasseurs secondaire et tertiaire, des cribles et des séparateurs hydrauliques pour permettre :

- Un recyclage complet des granulats excédentaires pour équilibrer la production en fonction de la demande
- Une bonne correction de la forme des granulats
- Une bonne qualité des coupures
- L'élaboration d'un sable de très haute qualité
- Une bonne adaptation du fonctionnement des machines de réduction à la dureté de la roche.

5. GRANULATS

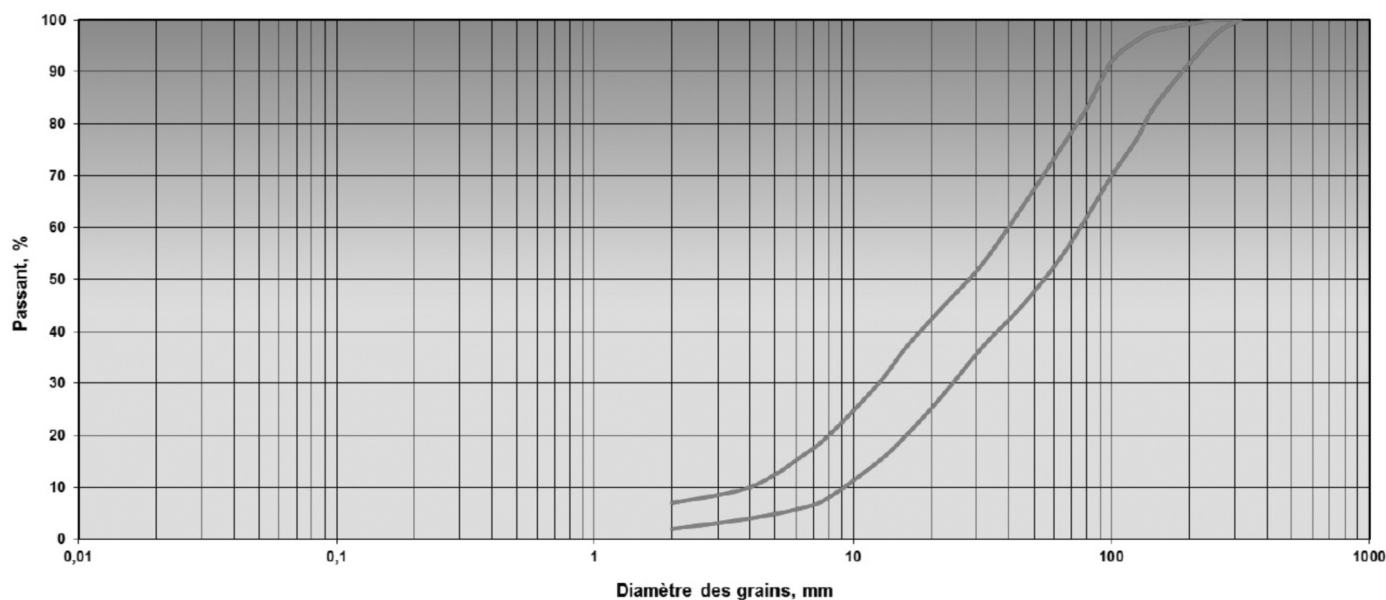
Plusieurs règles fondamentales doivent être respectées pour la fabrication de granulats pour béton à partir de MATEX.

5.1. D Max

Le D Max des granulats doit être limité à 16 ou 18 mm pour les raisons suivantes :

- Réduire l'influence des variations de la pétrographie sur les caractéristiques mécaniques des granulats et des bétons produits

Courbe granulométrique du marin concassé 0/150 ou 0/250 mm



Graphique n° 2 - Fuseau de MATEX conventionnel concassé.

- Favoriser le recyclage des granulats dans les concasseurs en réduisant les déséquilibres de production et en améliorant leur forme
- Faciliter l'ouvrabilité des bétons fabriqués avec des granulats entièrement concassés
- Permettre la production de SCC

5.2. Classes granulaires

Le nombre le plus réduit possible est souhaité pour faciliter le stockage et les opérations de manutention.

3 classes sont en général admises : 0/4 + 4/8, et 8/16 (ou à la limite 8/20 mm). La coupure à 8 mm est exigée pour produire les bétons projetés.

5.3. Le sable

Il est la clef de la réussite ou de l'échec de la transformation des MATEX en granulats pour béton.

Les exigences ci-dessous doivent venir préciser les exigences des normes NF P 18545 et EN 12620 :

- $\leq 63 \mu\text{m}$: 3% maximum, sauf pour un calcaire pur ou ce % peut être accepté jusqu'à 10 ou 12%
- **Module de Finesse** : Minimum 2,6, Maximum 3,2 avec une courbe de référence callée sur 3,0 comme cela est indiqué sur le graphique n° 3.

Ces exigences sont essentielles pour obtenir :

- Une très bonne ouvrabilité et une stabilité rhéologique du béton frais
- Une contribution à la durabilité du béton durci, car la perméabilité du béton est considérablement diminuée.

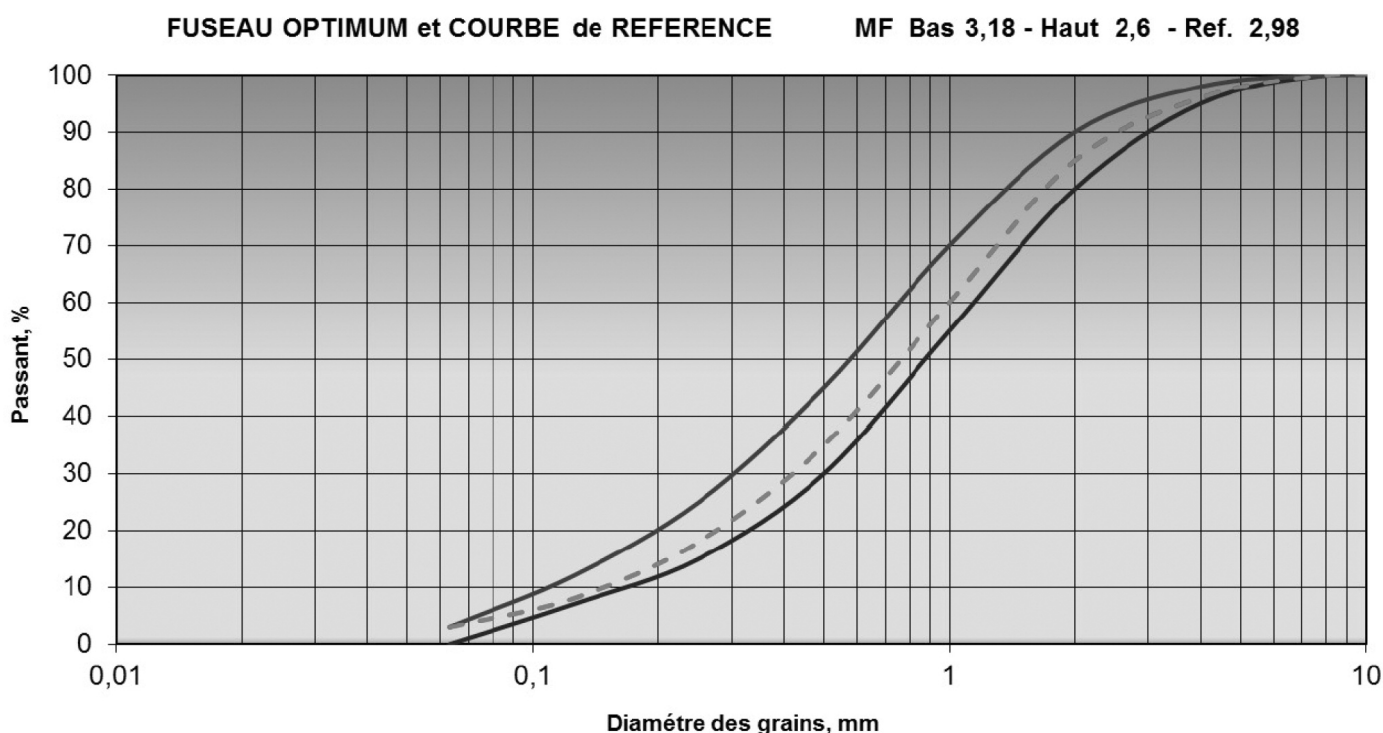


Photo n° 7 : Sable sur essoreur.

6. BETONS - GÉNÉRALITÉS

Les bétons fabriqués avec les granulats de MATEX doivent être destinés à toutes les différentes parties des ouvrages souterrains. On doit donc être en mesure de produire :

- Des mortiers de bourrage derrière les voussoirs
- Des bétons projetés
- Des RCC pour les radiers provisoires (souvent produits directement avec les MATEX criblés ou non)
- Des bétons coffrés pour le revêtement et les ouvrages particuliers



Graphique n° 3 : Fuseau de production du sable.

- Des bétons pour SLIP FORM - Pose des voies- ou pour coffrages grimpants - Puits -
- Des SCC pour le revêtement et pour le blocage des blindages et machines pour les ouvrages hydro-électriques
- Des BHP pour les voussoirs
- ...

6.1. Courbe granulométrique

Pour la plupart des bétons 0/16 mm, le squelette granulaire devrait s'inscrire à l'intérieur du fuseau du graphique n° 4 ci-dessous.

Le pourcentage de sable peut difficilement descendre en dessous de 40% (sauf pour les BHP de préfabrication).

Il peut atteindre 55 à 58 % pour les SCC.



Photo n° 8 : Mise en place du béton.

6.2. Caractéristiques des bétons

La plus grande partie des bétons utilisés dans les ouvrages souterrains doit correspondre selon EN 206 : 2013 à des

bétons : C 30 / 37 XC 3, XD 2, XA 2 avec un dosage en liant équivalent de 352 kg/m³ ($D_{\max} = 16$ mm).

Les caractéristiques et commentaires particuliers sont évoqués au § 7.

6.3. Production / Transport / Mise en place

Les bétons des tunnels longs et profonds sont souvent fabriqués par des centrales de grande capacité installées en souterrain et alimentées en granulats par convoyeurs à bande pour limiter la circulation des engins sur pneus à moteur thermique. Les distances de transport sont souvent importantes et peuvent exiger pour les bétons des DPU de l'ordre de 2 à 3 heures avec des températures ambiantes pouvant atteindre 30° C pour les tunnels profonds.

Le transport est réalisé par train avec des wagons malaxeurs et/ou véhicules sur pneus.

Pour certaines parties d'ouvrages, des trains à béton peuvent être utilisés pour réduire les problèmes liés à la DPU. Ils comprennent les wagons de granulats et de liant, les wagons de dosage et de malaxage – Photo n° 11.

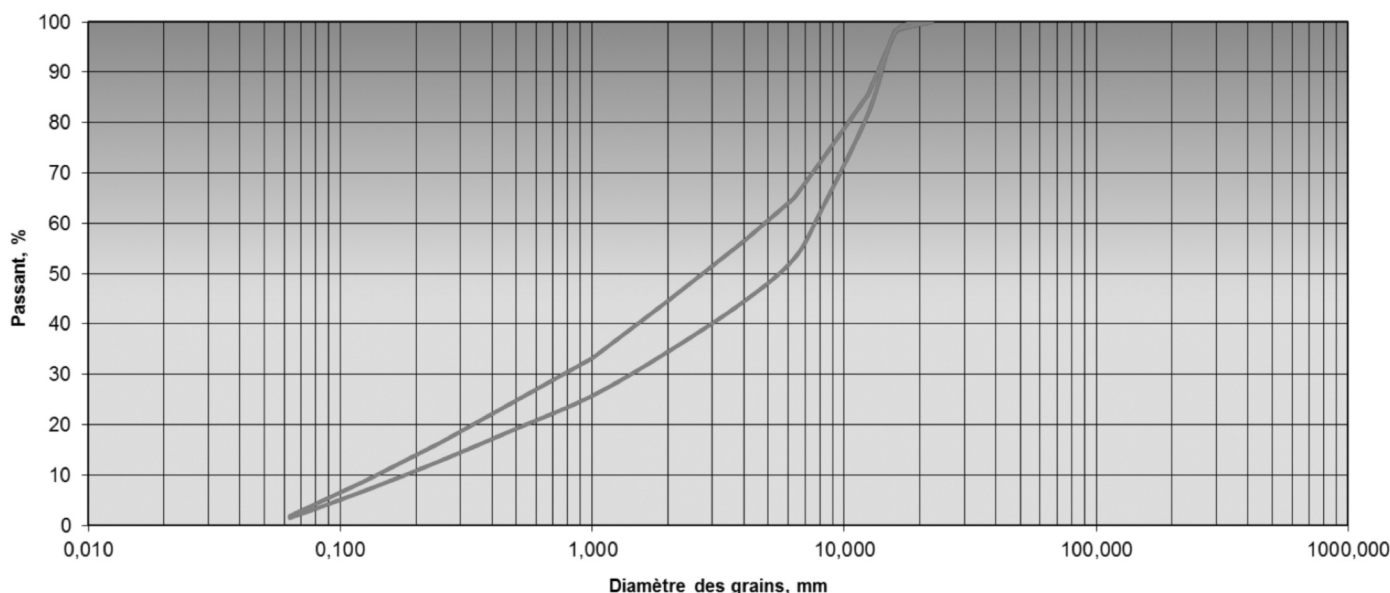
7. LES BÉTONS DE GRANULATS DE MATEX

L'APPLICATION DES NORMES EN 206 : 2013 ET EN 206/CN : 2014

7.1. Commentaire important

Les chapitres précédents ont permis de présenter les MATEX, la production des granulats issus de ces MATEX et les caractéristiques générales des bétons produits à partir de ces granulats.

Fuseau granulométrique du béton 0/16 mm sans le liant



Graphique n° 4 : Fuseau granulométrique des bétons.



Photo n° 9 : Centrale souterraine.



Photo n° 10 : Train à béton TSP 3x12 m³.



Photo n° 11 : Train à béton ATG.

Pour clore cet important sujet, il est indispensable de compléter cette analyse par l'intégration de quelques contraintes spécifiques liées à l'utilisation de ces bétons pour les travaux souterrains et à leur incidence sur l'application des normes :

- **Le comportement thermique des bétons** et l'obligation de trouver le bon compromis entre la nécessité de réduire le plus possible le dégagement calorifique du béton et de conserver un temps de coffrage des ouvrages acceptable par le planning ;
- **La durabilité des bétons** concernant plus particulièrement l'éventuel déclenchement de réactions destructrices à moyen ou long terme telles que **RAG** et ou **RSI / TSA**. Il est important de préciser que la détection avancée du risque RAG avec les granulats de MATEX est très difficile, voire impossible car
 - des roches qualifiées NR lors des reconnaissances peuvent s'avérer PR en profondeur lors de l'excavation
 - le temps d'attente du résultat des Tests de Performance est incompatible avec le planning de réalisation des travaux et les contraintes logistiques de stockage des MATEX.[4]

Ces deux contraintes ont pour conséquence une obligation de réduire le dosage en ciment, d'augmenter la quantité d'addition (si possible inhibitrice) et donc d'entrer en conflit avec le § 6.2 de l'EN 206 et ses exigences correspondantes.

Le dosage de référence en liant de ces bétons de granulats 0/16 mm entièrement concassé est de 400 kg/m³.

Les paragraphes qui suivent mettent en évidence l'influence que la définition normative peut avoir sur la qualité finale de ces bétons.

7.2. Bétons à Propriétés Spécifiées - § 6.2 EN 206

Sur ce chantier cité comme exemple, le Maître d'Ouvrage a fourni les granulats produits sur le chantier à partir des MATEX et a demandé à son entrepreneur, pour simplifier les contrôles, de prendre la responsabilité de la formulation et de la production des bétons selon le § 6.2 de l'EN 206. Les bétons de revêtement définis par un Ingénieur trop prudent étaient des C 30/37 XC 4, XD 3, XF 1, XA 1.

Pour être en conformité avec la norme et pour prendre en compte l'ouvrabilité demandée (550/600 mm) et le rapport E/L_{eq} , le dosage en ciment a dû être augmenté par l'entrepreneur pour devenir en final 352 kg/m³ de CEM II/B-M(S-T) 42,5 R et le dosage en cendres volantes réduit à 70 kg/m³ (16.7 % du liant).

Le résultat est montré sur les photos 12 à 14 ci-après : forte exothermie du béton avec des pointes enregistrées à 72° C dans les zones de forte épaisseur, donc très importante fissuration due au retrait thermique dont les réseaux ont été



Photo n° 12



Photo n° 13

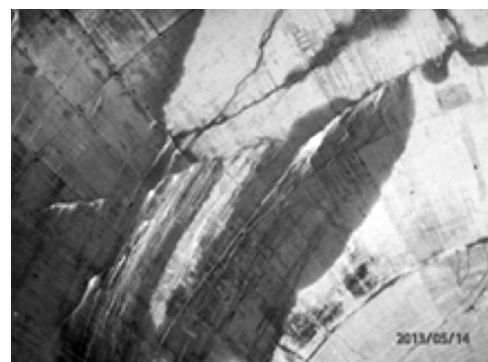


Photo n° 14

amplifiés par les très fortes variations d'épaisseur au contact direct du rocher et par le gradient thermique élevé. Le risque RAG a été confirmé par les Tests de Performance.

7.3. Bétons à Composition Prescrite - §6.3 EN 206 Bétons d'Ingénierie BICP EN 206/CN

L'utilisation de ces types de bétons engage la responsabilité du Maître d'Ouvrage qui produit les MATEX qui serviront à la fabrication des granulats. Le Maître d'Ouvrage doit apporter dans ces conditions à son entrepreneur la preuve que ses granulats permettront la fabrication de béton conforme aux caractéristiques demandées pour l'Ouvrage (béton frais et béton durci). Le Maître d'Ouvrage doit donc dans ces conditions faire toutes les reconnaissances et toutes les études préalables pour permettre d'insérer dans les documents d'appel d'offre les

composition de béton à respecter, qui seront propres à l'ouvrage et qui ne seront pas forcément en conformité avec toutes les exigences de l'EN 206.

Pour illustrer ce type de démarche, on peut par exemple se référer au Tunnel de Base du LÖTSCHEBERG qui a été un succès grâce à la volonté affirmée de BLS AT. Le Maître d'Ouvrage du Projet LYON – TURIN travaille aujourd'hui de la même manière (avec notamment le programme de recherche présenté par Loïc DIVET de l'IFSTTAR) [6].

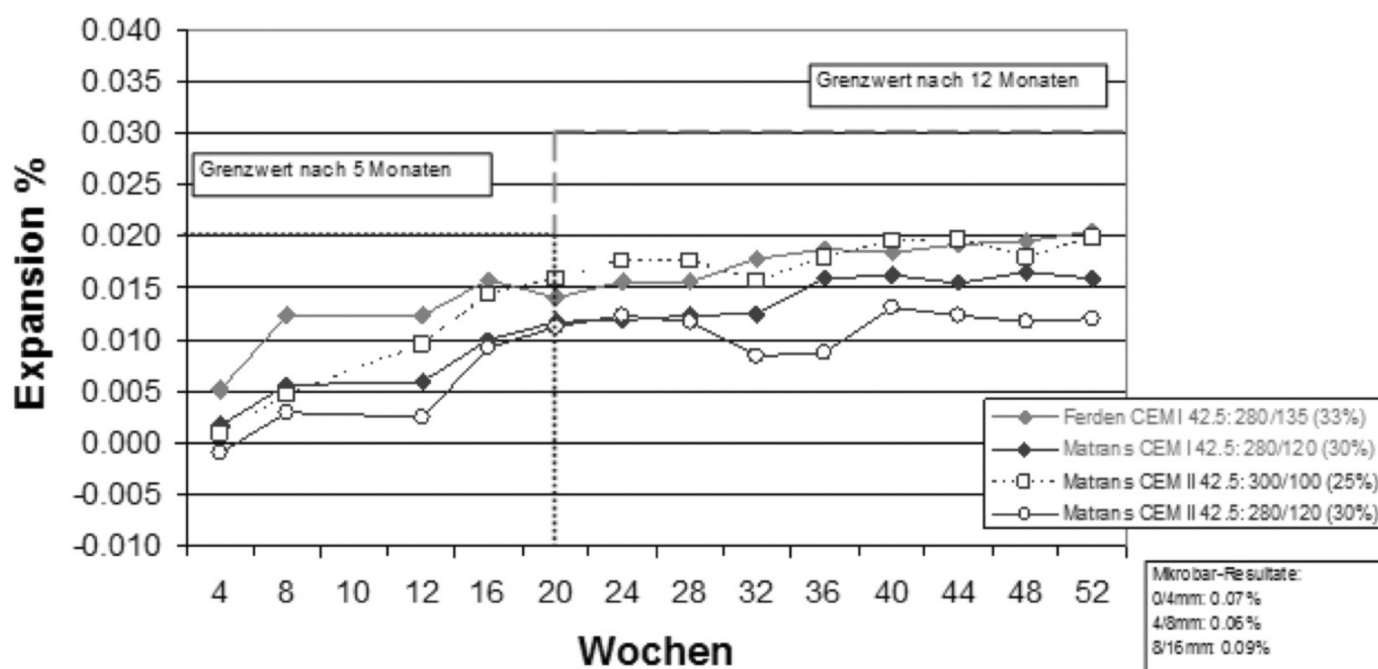
Sans entrer dans le détail du tunnel BLS AT, la plupart des bétons de revêtement avaient une composition permettant d'obtenir un béton C 30 / 37, le plus souvent dosé à 280 kg/m³ de CEM I 42,5 + 120 kg/m³ de cendres volantes (30 % du liant).

Les résultats ont été très satisfaisants, aussi bien pour le Maître d'Ouvrage que pour l'Entrepreneur :

RAG

Une importante série de tests de performance a été réalisée avant et pendant toute la durée du chantier.

Performance-Prüfungen: Süd-Ferden und Raron (Beton mit 0/16mm Zuschlägen)



Graphique n° 5 : Résultats des Tests de Performance.

La mesure de prévention mise en place – 70 % de ciment + 30 % de cendres volantes a parfaitement fonctionné, y compris avec les calcaires siliceux du DOLDENHORN au Nord. [7]

Il est intéressant de noter que les bétons de Grès et de Quartzite fabriqués à la station expérimentale LTF de Modane, selon la même formule, se sont également bien comportés. [8]

Température

Malgré la forte épaisseur du revêtement à certains endroits, la température du béton n'a jamais été au-delà de 50 °C et seule une fissuration minime, inévitable a été constatée.

7.4. Autre exemple de béton « Atypique »

De grandes masses de béton de blocage des blindages et des machines tournantes – levées de 1.50 m avec des étapes de 250 à 400 m³ - sont en cours de mise en place sur l'Aménagement hydro-électrique de Nant de Drance.

Un SCC C 30/37 à 90 jours a été testé et validé pour ce travail afin de prendre en compte les contraintes de RAG et de températures évoquées ci-dessus et minimiser le retrait. Ce béton contient 225 kg/m³ de CEM II/B-M(S-T) 42,5 R + 255 kg/m³ de cendres volantes avec $E/L_{Eq} = 0.53$ (photo n°15) :

- Température maximum enregistrée = 58 °C
- $R_{c\ 90j} = 45/50$ MPa
- Perméabilité à l'eau sous pression (EN 12390-7) = 15 à 20 mm

7.5. Autres contraintes

On ne peut pas terminer cette présentation sans évoquer la présence de quelques éléments en principe impropres à la fabrication de granulats pour des bétons de qualité :

- L'un d'eux est le Mica que l'on peut rencontrer en proportion importantes dans certains Micascistes et Gneis. Il vient principalement perturber la rhéologie des bétons et leur DPU. L'extraction du Mica dans le sable est possible mais coûteuse. L'expérience du GOTTHARD a montré qu'on savait utiliser correctement du sable contenant jusqu'à 35/40 % de Mica dans sa fraction 250/500 μ m.
- Une autre famille déjà évoquée ci-dessus est celle des matériaux riches en sulfates pouvant être apportés par le gypse, l'anhydrite mais aussi les pyrites. Cette famille doit être surveillée de près car elle peut être à l'origine de dégâts considérables dans les bétons. Les techniques d'analyse en ligne deviennent indispensables ; elles sont en cours d'évolution rapide.

8. CONCLUSION

Cette communication avait pour objet de présenter ce nouvel exercice que constitue la gestion et le traitement des matériaux provenant de l'excavation des ouvrages souterrains. Pour ceux qui pouvaient encore en douter, elle démontre que ce gisement particulier est exploitable pour produire notamment des granulats pour béton sous réserve que la démarche soit bien préparée par le Maître d'Ouvrage avec une campagne d'investigation des MATEX et d'essais sur béton adaptée et réalisée dès les



Photo n° 15 : SCC de blocage des blindages.

Etudes Préliminaires. Cette démarche devra être intégrée aux documents d'Appel d'Offre de l'Ouvrage à réaliser pour proposer à l'Entrepreneur des solutions d'exécution qui éviteront tout contentieux ultérieur ; elle aura aussi l'avantage important qui consiste à faire sortir les MATEX de leur statut original de « Déchet », ce qui facilitera grandement l'exécution de la partie administrative du projet. L'expérience acquise sur les grands projets et de la mise en application de quelques convictions personnelles ont permis la rédaction de ce document qui pourra, si son intérêt est confirmé, servir de base à l'élaboration de « Documents Guide » dont la profession a grand besoin.


9. REMERCIEMENTS

L'auteur remercie :

- La direction du projet LTF et particulièrement A.CHABERT, L.BRINO et X.DARMENDRAIL
www.ltf-sas.com
- L'IFSTTAR et particulièrement L.DIVET
www.ifsttar.fr
- La Direction de BLS AT et particulièrement P.TEUSCHER
- La direction du projet NANT de DRANCE et particulièrement E.WUILLOUD, JF.NICOD et G.SEINGRE
www.ndd.ch
- Le projet de recherche DRAGON (Development of Ressource-efficiency and Advanced under GrOund techNologies) et particulièrement R.GALLER, financé par l'Union Européenne et enregistré au FP7 / 2007 - 2013 sous le n° 308389
www.dragonproject.eu
- C.THALMANN et le bureau B+G Betontechnologie + Materialbewirtschaftung CH.3073 GÜMLIGEN
www.BplusG.ch

- HERRENKNECHT (Membre du projet DRAGON) et particulièrement T.EDELMANN, C.HIMMELSBACH et G.GAL
www.herrenknecht.com

10. RÉFÉRENCES

- [1] J.Pralong, C. Thalmann, J.Burdin "LBT-Ausbruchmaterial Bewirtschaftung / Betontechnologie"
Swiss Tunnel Kongress- Luzern - 2002
- [2] AFTES – GT 35 – Recommandation n° GT35R1F1 « La Gestion et la Valorisation des Matériaux d'Excavation » 2006 www.aftes-asso.fr
- [3] Projet de Recherche Européen  www.dragonproject.eu
- [4] FD P18-464 « Béton – Dispositions pour prévenir les phénomènes d'alcali- réaction »
- [5] J.Burdin, C.Thalmann, C.Carron, L.Brino « GVME- Analyse comparative de 3 projets, BLS AT, ATG, LTF » *Congrès International des Tunnels » AFTES – Chambéry 2005*
- [6] L.Divet, J.Colas, T.Chaussadant, S.Lavaud, B.Desrues « Perspectives de valorisation de granulats riches en sulfates » *AFGC GC 2015*
- [7] C.Thalmann, J.Pralong, J.Burdin, H.Schmid « AAR- Prevention for the longest tunnels – AlpTransit Gotthard and Lötschberg in Switzerland" *12th International Conference on Alkali-Aggregate- Reaction in Concrete October 15-16, 2004, Beijing, China*
- [8] J.Burdin, X.Darmendrail, J.Rimey, L.Brino « Nouvelle liaison ferroviaire LYON-TURIN –Une approche d'étude originale pour la valorisation des déblais des tunnels » *Revue TOS n°176 Mars-Avril*