Gestion et Valorisation des Matériaux d'Excavation de Tunnels
Analyse comparative de 3 grands projets
St. GOTHARD, LOETSCHBERG, MAURIENNE-AMBIN

Cédric THALMANN B-I-G Bureau de Géologie de l'Ingénieur SA - CH - 3034 Wabern
Christophe CARRON, SRP AG – CH 3900 - Brig
Lorenzo BRINO, LTF-SAS – I – 10121 Torino

Jacques BURDIN, Ingénieur Conseil – F – 73000 Chambéry

Abstract **:** The qualification, the handling and the valorization of tunnels excavated materials are today playing a big and necessary game within the tunnelling business, for the owners, the designers, the engineers and the contractors.
They are one of the basic parameters of the sustainable development policy and they are heavily participating to a project decision making process.
The hereunder presentation is pointing out some major parameters concerning the treatment of the excavated materials of 3 huge tunnel projects and is making interesting comparisons related to technical, contractual and economical matters.
This is giving a first industrial feed back very useful for all the engineers dealing with the tunnelling business.

Résumé **:** La gestion et la valorisation des matériaux d'excavation de tunnels constituent aujourd'hui une démarche importante et indispensable pour les Maîtres d'Ouvrage, les Projeteurs, les Maîtres d'œuvre, les Ingénieurs et les Entrepreneurs.
Elles s'inscrivent d'autorité dans le concept de développement durable et participent très largement à l'obtention des nécessaires autorisations de construire.
La présentation qui en est faite ici met en évidence quelques paramètres déterminants de la démarche sur 3 grands projets en réalisant d'intéressantes comparaisons techniques, contractuelles et économiques.
Elle constitue un premier retour d'expérience d'envergure qui sera utile à tous les acteurs de la construction de tunnels.

1. Introduction

Les grandes traversées alpines

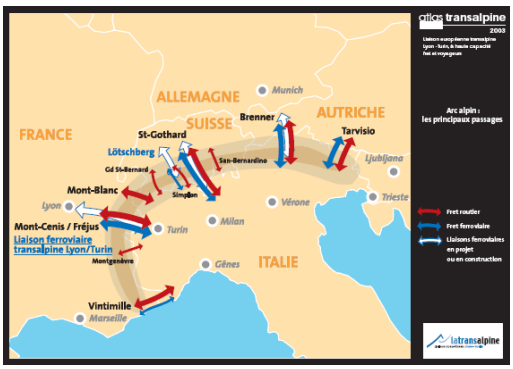

Figure 1

La construction de l'Europe va augmenter les échanges entre les différents pays et va générer un fret marchandises croissant entre le Nord et le Sud et entre l'Ouest et l'Est (figure 1).

La saturation des axes routiers impose la mobilisation ferroviaire, avec des conditions d'écoulement de trafic de bonne qualité et donc pour franchir les Alpes la nécessité de construire les tunnels de base qui, du même coup, permettront la réalisation de lignes à grande vitesse pour les voyageurs.

Trois projets seront traités, 2 en cours de réalisation, le LOETSCHBERG et le GOTHARD en Suisse, le troisième en phase finale d'étude, le Tunnel de MAURIENNE-AMBIN sur l'axe LYON-TURIN.

La valorisation des matériaux d'excavation

Ces grands ouvrages ont mis en évidence 3 paramètres déterminants. L'énorme quantité des matériaux extraits des tunnels, les grandes surfaces nécessaires à la mise en stock, l'obligation devant laquelle se trouvent les réalisateurs des projets de respecter une politique de développement durable.
Ainsi, s'est imposée rapidement la nécessité absolue de valoriser le plus possible les matériaux d'excavation des tunnels. D'apparence simple, l'exercice n'est pas toujours facile. Les chapitres ci-après présenteront de manière comparative les caractéristiques propres à chaque projet.

2. Présentation des projets
Description sommaire des ouvrages

2.1.1. St. GOTHARD

L'idée de percer un tunnel de base traversant le massif du Saint-Gothard date de 1947. Mais ce n'est qu'un demi-siècle après le premier projet de 1962 que le plus long tunnel ferroviaire du monde devrait effectivement être mis en service (AlpTransit SA, 2005).

Les nouvelles lignes ferroviaires à travers les Alpes (NLFA) ouvrent les portes de la Suisse au fret lourd et au trafic à grande vitesse: les futurs trains de voyageurs circuleront à des vitesse de 200 à 250 km/h. Les lignes constituent par ailleurs une percée imposante à travers l'espace alpin, puisque le tunnel de base du Saint-Gothard, avec ses 57 km, sera le plus long tunnel ferroviaire du monde (figure 2). Le projet consiste à réaliser deux tunnels à voie unique sans galerie de service, dotés de deux stations multifonctions, de diagonales d'échange et d'environ 180 rameaux de communication, de sorte que chacun des deux tunnels puisse servir de tunnel de secours à l'autre en cas d'incident. La construction du tunnel de base va donner naissance à une ligne de plaine moderne dont le point le plus élevé, sera situé à 550 m au-dessus du niveau de la mer (au lieu de 1150 m actuellement).

L'extension et la modernisation du réseau ferré existant en Suisse doivent s'opérer selon quatre axes principaux : l'amélioration qualitative de la position de la Suisse, un plus grand respect de l'environnement, la garantie du financement des transports publics et l'intégration de l'infrastructure suisse des transports dans le réseau européen.
Le peuple suisse a accepté le projet relatif à la réalisation et au financement de l'infrastructure ferroviaire. Son financement sera effectué par le biais d'un fonds spécial, alimenté par l'impôt sur les carburants, la redevance forfaitaire sur le trafic des poids lourds ainsi que par le un pour mille de la TVA. Sur près de 20 milliards € qui seront investis, environ la moitié sera consacrée à la réalisation des nouvelles transversales alpines. La construction du tunnel de base du Saint-Gothard coûtera environ 5 milliards d'euros.

Géologie
Les massifs de l'Aar et du Saint-Gothard constituent l'épine dorsale des Alpes suisses. Ils se composent essentiellement de gneiss et de granites (figure 3). Des sédiments ont été pincés entre ces massifs et certaines parties sont très fracturées, les couches géologiques les plus diverses seront ainsi traversées, des granites les plus durs du massif du Saint-Gothard aux roches les plus tendres du massif intermédiaire du Tavetsch en passant par le gneiss penninique extrêmement comprimé.
La synclinal de Piora constituait un endroit clé pour la géologie : sa structure et son extension étaient inconnues au début du projet : quatre forages réalisés obliquement jusqu'au niveau du tunnel ont permis de prouver la présence de roches stables, sans circulation ni pression d'eau. Ce résultat particulièrement encourageant a été confirmé par les carottes, des mesures de températures et des observations sismiques.
Pour la traversée du massif intermédiaire du Tavetsch, des méthodes spéciales de creusement, tenant compte des conditions de pression très élevées par endroit, seront utilisées (Keller, 2002).

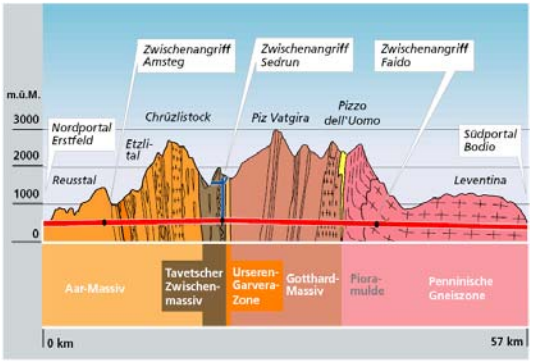

Figure 3 – St Gothard - Coupe géologique

Figure 2 – St Gothard - Schéma de principe

2.1.2. LOETSCHBERG

Le tunnel de base du Loetschberg s'inscrit, comme le St. Gothard, dans le cadre de l'intégration transalpine de la Suisse au réseau ferroviaire européen à haute vitesse. Long de 34.6 km, il s'étend, du nord au sud, de Frutigen, dans le canton de Berne, à Rarogne dans la vallée du Rhône en Valais. Il se compose de deux tubes unidirectionnels parallèles (figure 4).
Cinq attaques principales ont été planifiées afin d'optimiser le planning d'exécution. Les travaux de construction des deux tubes du tunnel ont commencé en 1999. Le percement final a eu lieu le 28 avril 2005. La mise en service du tunnel est prévue pour l'année 2007, son coût est d'environ 2.13 milliards d'Euros
Côté nord (canton de Berne), le tunnel de base est construit à partir des attaques de Frutigen et de Mitholz ; côté sud (canton du Valais), à partir des attaques de Ferden, de Steg et de Rarogne. Dans la partie nord, il est excavé uniquement par la méthode conventionnelle (foration, minage, marinage), il est percé au tunnelier et à l'explosif dans la partie sud. Au nord du tunnel, l'ensemble de la gestion des matériaux d'excavation (valorisation, stockage définitif) s'effectue sur la plate forme de la fenêtre de Mitholz. Au sud en revanche, avec ses trois attaques distinctes et une seule plate forme de traitement, la logistique joue un rôle primordial. A cet égard, il est important de souligner que le Maître d'Ouvrage a choisi de créer deux lots indépendants pour la gestion et la valorisation des matériaux d'excavation.

Géologie du tunnel de base du Loetschberg

Le tunnel de base du Lötschberg traverse quatre grandes formations géologiques, du nord au sud : la nappe du Wildhorn, celle du Doldenhorn, le massif de l'Aar et l'autochtone Gampel-Baltschieder.

Les prospections géologiques nécessaires à l'élaboration du projet du tunnel ont aussi servi à l'établissement d'un concept de gestion et de valorisation des matériaux d'excavation.

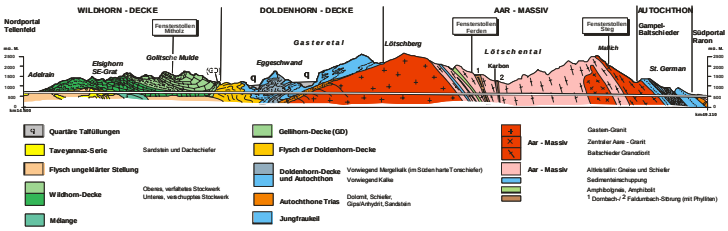

Figure 5 – Loetschberg - Coupe Géologique

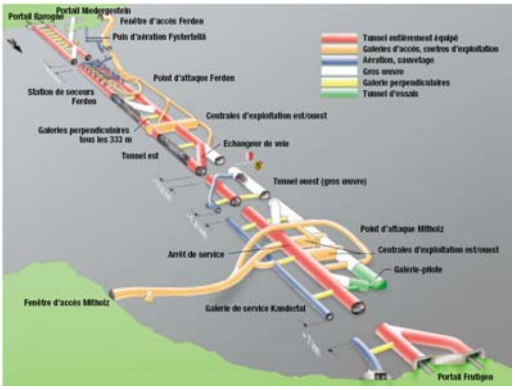

Figure 4 – Loetschberg - Schéma de principe

2.1.3. MAURIENNE-AMBIN

Le principal ouvrage de la nouvelle liaison ferroviaire Lyon-Turin sera un tunnel de base de 53 kilomètres qui passera sous le massif d'Ambin (figure 6). L'objectif de cette nouvelle liaison est mixte, voyageurs (liaison grande vitesse) et marchandises (fret et autoroute ferroviaire). Pour les voyageurs, des gains de temps significatifs sont attendus : de 4h17 aujourd'hui à 1h45 avec le projet pour le trajet Lyon-Turin ; de 6h51 à 4h25 pour le trajet Paris-Milan.
Pour le trafic marchandises, la ligne actuelle plus que centenaire, arrivera à saturation d'ici une quinzaine d'années. Dans le même temps, la croissance économique devrait faire doubler les échanges au travers des Alpes d'ici à 2030, dépassant la capacité des tunnels routiers du Fréjus, du Mont-Blanc et de l'itinéraire de Vintimille si la route supportait l'essentiel de cette croissance. Le projet permettrait un transfert modal et ainsi un rééquilibrage des transports entre la route et le fer.

Le premier débat sur le Lyon-Turin a été organisé en 1987. Sur la base des études de faisabilité technique et socio-économique de sa section internationale réalisées par le GEIE Alpetunnel de fin 1994 à fin 2000, un accord intergouvernemental franco-italien a été signé le 29 janvier 2001, pour la réalisation de la ligne nouvelle Lyon-Turin. Cet accord est devenu traité international en 2002 après sa ratification par les parlements français et italiens. Créée le 3 octobre 2001 par RFF et RFI, Lyon Turin Ferroviaire (LTF-SAS) est le Promoteur chargé de conduire les études d'avant-projet, reconnaissances et travaux préliminaires de la partie commune franco-italienne de la nouvelle liaison. L'Avant Projet Sommaire « Progetto Preliminare » (APS/PP) a été approuvé le 8 octobre 2003 par la Commission Inter Gouvernementale (CIG). Le Progetto Preliminare a été approuvé par le CIPE le 5 décembre 2003. L'APS a été approuvé par une décision ministérielle française le 22 décembre 2003.

Le 5 mai 2004, les ministres français et italiens des transports ont signé un accord d'entente qui définit les principes de répartition du financement entre les deux pays à parts égales, de l'ensemble du Lyon-Turin, ainsi que du financement de la partie commune franco-italienne (63% pour l'Italie et 37% pour la France) avec un financement complémentaire de l'UE à déterminer par la Commission. La phase d'étude d'APR/PR (Avant Projet de Référence / Progetto di Riferimento) est actuellement en cours. Ces études conduiront à la réalisation du Progetto Definitivo pour la partie italienne.

Les travaux préliminaires sont actuellement en cours sur 2 descenderies et une galerie de reconnaissance. Le tunnel de base devrait être ouvert à la circulation des trains à l'horizon 2018/2020, son coût devrait être de l'ordre de 4 milliards d'euros.

Géologie

Au niveau géologique, les principales contraintes que rencontrera le tunnel de base sont liées au fait que le projet recoupe les Alpes d'ouest en est, depuis le domaine externe, jusqu'au domaine interne (Antoine et al., 1993 ; Darmendrail et al., 2005).

La conséquence en est des formations géologiques variées aux caractéristiques géomécaniques et hydrogéologiques très différentes, dans un contexte structural complexe, sous des couvertures importantes (atteignant 2500 m sous le massif d'Ambin), rendant difficile la réalisation de modèles prévisionnels.

Deux problèmes principaux sont liés à ces couvertures. D'une part, les températures élevées qui pourraient dépasser 30°C dans certaines zones du Houiller, et approcher 50°C dans le massif d'Ambin. D'autre part, les contraintes très élevées dans les zones sous fortes couvertures avec une anisotropie mise en évidence par la plupart des mesures faites en forages (Fabre et al, 1996).

L'eau sera l'élément susceptible de poser le plus de problèmes sur quelques sections du projet. D'un point de vue nature et caractéristique géologiques, certaines roches peuvent présenter des risques en phase de travaux ou au niveau de leur mise en dépôt (charbon dans le Houiller, sulfates dans le Trias, etc.).

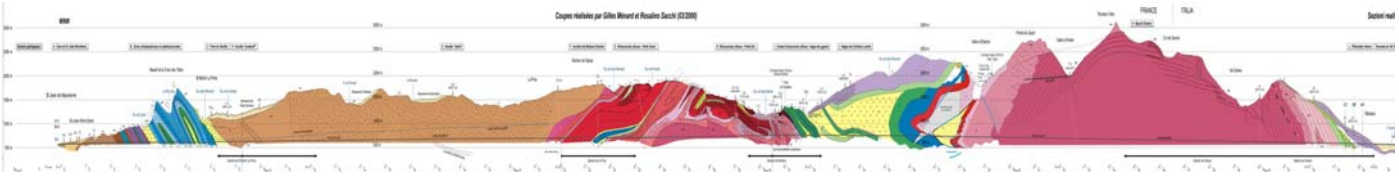

Figure 7 – Maurienne-Ambin - Coupe géologique

NB :
Les informations transmises dans cette présentation relatives à la gestion et la valorisation des matériaux d'excavation sont celles provenant des études d'APS et des travaux préliminaires des descenderies de Modane et de St. Martin.

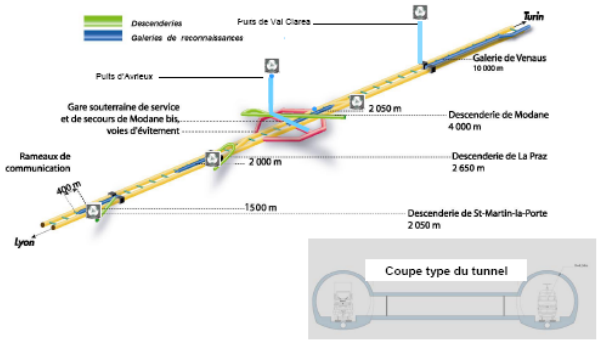

Figure 6 – Maurienne-Ambin - Schéma de principe

Tableau comparatif – Caractéristiques des Tunnels – tableau 1

Projets	Longueur	Type	Section m²		Durée des Travaux	Mise en Service
			TBMl	Conventionnel		
GOTTHARD	2 x 57 km	bitube unidirectionnel	68	68	13 ans	2015
LOETSCHBERG (1)	34.6 km	bitube unidir.Ferden-Rarogne 13 km	65	70	1999 - 2006	2007
		monotube unidir. Frutigen-Ferden 21,6 km	65	70		
MAURIENNE-AMBIN	2 x 53,1 km	bitube unidirectionnel	65	85	9 ans	2018 env.

(1) Les 14 km du 2ème tunnel Ferden-Mitholz sont excavés, mais ne seront pas équipés en première phase.

3. Matériaux extraits, bétons à produire – tableau 2

	Matériaux extraits kt			Bétons à produire m3				Granulats à	% des matériaux extraits
	Conv.	TBM	Total	Projeté	Coffré	Voussoirs	Total	Produire kt	
GOTTHARD	6 000	17 800	23 800	500 000	2 250 000		2 750 000	5 500	23
LOETSCHBERG	12 700	3 800	16 500	299 000	1 229 000	62 000	1 590 000	3 180	19
MAURIENNE AMBIN	8 700	15 600	24 300	600 000	2 650 000		3 250 000	6 500	27

4. Qualité des matériaux extraits et utilisation

Récapitulatif synthétique des caractéristiques exigées

Les matériaux d'excavation possèdent, tous, une valeur intrinsèque définie par la géologie traversée et par le mode d'excavation (tunnelier ou conventionnel). Chaque type de matériaux peut être utilisé en fonction de ses qualités. Selon l'importance des traitements nécessaires, une mise en dépôt définitif directe (sur une zone dite « de matériaux excédentaires » ZME) est justifiée pour une partie d'entre eux.
Trois classes de valorisation des matériaux d'excavation ont été définies pour la gestion des matériaux d'excavation des tunnels. Le schéma qui suit indique les critères de classement et les utilisations envisagées des différentes classes (figure 8).

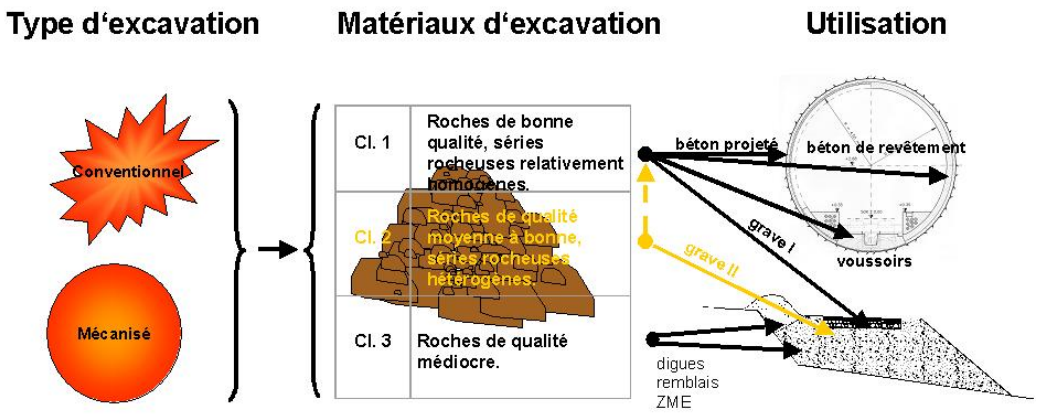

Figure 8

La fabrication des bétons projetés et des bétons coffrés avec des matériaux excavés dans les tunnels repose essentiellement sur trois piliers :

- une sélection judicieuse des matériaux bruts basée en particulier sur la coupe géologique prévisionnelle, les reconnaissances et l'identification opérée directement à l'avancement.
- une technique de préparation optimalisée en fonction des matériaux bruts.
- la maîtrise de la fabrication et de la mise en œuvre de béton comprenant des granulats concassés.

La délimitation des responsabilités implique qu'on soumette la sélection et la mise à disposition des matériaux à des critères objectifs à chaque interface du processus de livraison et de production des granulats. Ces interfaces correspondent :

- à la sélection des matériaux bruts qui seront utilisés dans le processus de transformation (tri des matériaux);
- à la remise des granulats préparés à l'entreprise chargée de la construction du tunnel.

Les matériaux bruts sont répartis selon trois classes de qualité :
Classe 1 : matériaux d'excavation appropriés pour la production de granulats de béton.
Classe 2 : matériaux d'excavation non appropriés pour la production de granulats de béton pouvant être utilisés notamment pour des remblais.
Classe 3 : matériaux d'excavation pollués (p. ex. contaminés par de l'huile ou d'autres substances) ou impropres à toute utilisation (par exemple évolutifs)
Sur les deux projets suisses et pour s'assurer que les objectifs assignés à la gestion des matériaux soient atteints, les maîtres d'ouvrage ont institué une «Direction spécialisée dans la gestion des matériaux» appelée à seconder la direction des travaux. La qualité des matériaux bruts est appréciée une première fois au front de taille, en collaboration étroite avec le géologue de la direction locale des travaux.

Les directions spécialisées disposent de plusieurs laboratoires pour contrôler les caractéristiques des matériaux. Un laboratoire externe est chargé des contrôles de routine, qui sont effectués à intervalles réguliers. Les données recueillies servent à documenter la qualité des matériaux excavés et la granularité des matériaux préparés. Pour les essais nécessitant la qualification immédiate du marin à l'avancement, c'est le laboratoire de chantier installé au portail du tunnel qui intervient. Il permet d'appréhender et d'évaluer sur place, en l'espace de quelques heures, les variations inattendues de la qualité des matériaux excavés (THALMANN, 1996 et 2004). Sur le plan normatif, les spécifications de la norme européenne relative aux granulats pour béton (EN 12620) prévaut généralement.

Trois critères qualitatifs principaux permettent le tri des matériaux bruts:

- La dureté minimale de la roche.
- La teneur en composantes pétrographiques non appropriées.
- La potentialité à la réaction alcali-granulat (RAG)

Les analyses suivantes ont permis de quantifier ces trois critères (tableau 3).

- Le Point Load et les essais d'abrasivité et de broyabilité pour déterminer la dureté de la roche. Des essais de Los Angeles sur les granulats produits permettent de contrôler, au bout de la chaîne de production, les résultats sur les matériaux bruts.

- L'analyse visuelle du marin et les analyses microscopiques de lames minces permettent la détermination de la pétrographie des roches extraites.
- Le risque potentiel d'alcali-réaction des granulats, RAG, est évalué par l'essai microbar (AFNOR P 18-579).

Tableau 3: Critères de tri concernant la dureté de la roche et la pétrographie pour la **Classe 1**

Type d'essai	Norme d'essai	Indicateur à vérifier	Remarques
Indice de broyabilité	AFNOR P 18-579 (procédure modifiée pour les matériaux extraits au tunnelier)	≤ 70 [-] ≤ 75 [-]	Critère obligatoire (si valeur = 70-75: effectuer un essai I_{S50})
Indice de résistance au poinçonnement I_{S50}	ISRM 1985 (procédure modifiée pour les matériaux extraits au tunnelier)	I_{S50} parallèle: ≥ 2.5 [N/mm^2] I_{S50} isotrope: ≥ 3.5 [N/mm^2]	
Pétrographie à l'échelle macroscopique		Si teneur en phyllosilicates ≤ ≈ 20 [% des pces]: pétrographie: e. o.	Evaluation visuelle sommaire en galerie
Pétrographie à l'échelle microscopique (lames minces)		-	Description minéralogique; degré d'altération; risque de RAG
Composants inadéquats au plan pétrographique: fractions 1/4, 4/22, 22/128mm (sauf phyllosilicates libres)	(Selon définition AlpTransit, par référence à la norme SIA 162/1)	≤ 10 [% pondéraux]	
Phyllosilicates libres* dans le sable brut (0.25-0.50mm)	(Selon définition AlpTransit)	≤ 40 [% des pièces]	
Réactivité potentielle aux alcalins (RAG)	AFNOR P18-588	Considéré non réactif si expansion ≤ 0.11%. Réactivité maximale admise: exp. ≤ 0.20%	Si expansion > 0.11%, utilisation d'une formulation stable vis à vis de la RAG.

* phyllosilicates libres: phyllosilicates dégagés de la roche, non inclus dans celle-ci

Classement des matériaux extraits par ouvrage – Tableau 4

	Total kt	Cl. 1			Cl. 2			Cl. 3
		Production	Utilisation	%	Production	Utilisation	%	Production
GOTTHARD	23 800	10 400	5 500	53	11 500	5 200	45	1 900 (1)
LOETSCHBERG	16 500	5 200	4 800	92	3 500	1 500	43	7 800 (2)
MAURIENNE AMBIN	24 300	9 100	6 200	68	14 200	x	x	1 000 (1)

(1) matériaux pollués, instables chimiquement, boues

(2) ventilation à préciser car ce chiffre englobe les matériaux de classes 1 et 2 mis en ZME

5. Organisation des chantiers

5.1. St. Gothard

Photo 1 – St-Gothard – MBW Bodio

Photo 2 – St-Gothard – MBW Sedrun

Bodio
Le tronçon de Bodio est le plus long du tunnel. Les premiers mètres du tunnel on été excavés à ciel ouvert et suivis d'un tronçon en roche friable pour finalement mettre à jour une roche dure permettant l'avancement au tunnelier. Une galerie de contournement a été réalisée dans la zone du portail afin de permettre une desserte plus rapide des sites de montage souterrains. Le remblai non utilisé est transporté par un convoyeur à bande de 3,1 km de longueur installé dans un tunnel de 5 m de diamètre.

Sedrun
La desserte du tronçon de Sedrun s'opère au moyen d'une galerie d'accès d'une longueur de 1 km et deux puits de 800 m de profondeur. Ce tronçon comporte également l'une des deux stations multifonctions, lesquelles abriteront les installations techniques ferroviaires ainsi que les stations de secours et des diagonales d'échange pour le passage d'une voie à l'autre.

5.2. Loetschberg

Photo 3 – Loetschberg Mitholz

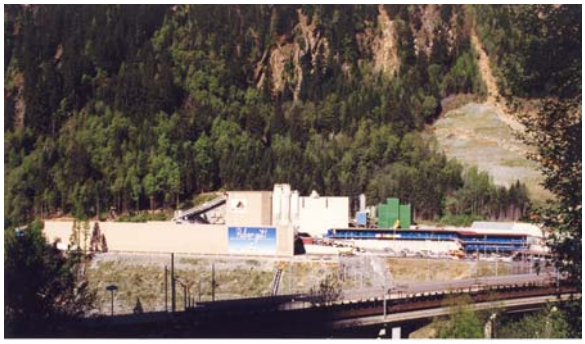

Photo 4 – Loetschberg Ferden

Photo 5 – Loetschberg – MBW Rarogne

Le centre de gestion et de valorisation des matériaux d'excavation est un élément central du concept de gestion des matériaux d'excavation du Loetschberg sud, il a pu être implanté sur l'ancien aéroport militaire de Rarogne, dans la vallée du Rhône, au lieu-dit Eya. Les distances aux portails des différentes attaques sont réduites : environ 5 km du chantier de Steg, 50 km par train via Brigue de celui de Ferden (6 km à vol d'oiseau) et 800 m de celui de Rarogne. Les zones de Mise en Dépôt Définitif (ZME) ou de modelés paysagers de Goler et de Riedertal se situent elles aussi à quelques centaines de mètres du centre d'Eya.

5.3. Maurienne Ambin

Photo 6 – Maurienne-Ambin – STM Modane

Photo 7 – Maurienne-Ambin - St. Martin-la-Porte

La station de traitement des matériaux de Modane a été construite dans le double but de réaliser des essais industriels de validation de la valorisation de certains matériaux difficiles et de fabriquer les granulats nécessaires aux bétons des 3 descenderies de Modane, St. Martin et La Praz. Plusieurs familles de matériaux seront testées, en provenance de Modane, St. Martin, La Praz et également Venaus en Italie et notamment les grès du Houiller et les micaschistes du Permien et du socle. Les installations actuelles sont uniquement dimensionnées pour ces travaux, elles devront impérativement être renforcées notamment pour ce qui concerne les surfaces de travail pour la réalisation du tunnel de base.

5.4. Les modelés paysagers

Les modelés paysagers constituent un moyen très intéressant d'utiliser les matériaux d'excavation. Voici 3 exemples :

- Au St. Gothard, le remblaiement très localisé du lac d'Uri :

Le projet de remblaiement dans le lac d'Uri prévoit la création de deux groupes d'îles sauvages similaires au delta existant, à gauche de l'embouchure de la Reuss. La reconstruction de zones d'eau peu profonde à haute valeur écologique est prévue. Cette protection naturelle des rives a pour but de mettre fin à l'affouillement des sols, tout en améliorant les conditions de vie de la flore et de la faune et en offrant un lieu de détente à la population.
Le projet de remblaiement permet la création d'îles d'une surface totale de deux hectares ainsi que de six hectares d'eau peu profonde. La profondeur maximale de remblaiement s'élève à 55 m. Afin de limiter les émissions de matériaux en suspension, le remblaiement s'effectue à l'aide d'un tablier en polymère d'une longueur maximum de 30 m, suspendu dans un port flottant (Gemperli et Schilter, 2004).

- Au Loetschberg, la construction d'un stand de tir à Riedertal :

Une partie des matériaux non transformables en granulats a servi à la construction d'une digue de protection pour l'édification d'un futur stand de tir d'importance régionale. Le stand de tir est planifié à l'intérieur d'un L dessiné par la digue.

- Au dessus du Tunnel de Maurienne Ambin, la réhabilitation de la carrière du Paradis au col du Montcenis :

La carrière du Paradis ayant servi à fournir les matériaux pour la construction du barrage du Montcenis sera remblayée et réhabilitée avec les matériaux d'excavation excédentaires ; quelques 5 mio m^3 de déblais acheminés par un transporteur à câble pourraient ainsi y être stockés.

5.5. Protection de l'environnement, la lutte contre les poussières

Des premières réflexions de planification des projets à la phase d'exécution, la lutte contre les poussières doit être une préoccupation de l'ensemble des intervenants. En premier lieu, lors de l'établissement du concept de gestion des matériaux d'excavation, la mise en place de procédés de fonctionnement qui minimisent les vecteurs d'émissions de poussières, a retenu l'attention des projeteurs et des autorités compétentes. Le concept logistique ainsi développé qui favorise les transports de matériaux par rail et par convoyeurs à bande, est l'élément central pour la diminution des émissions de poussières. Notons que la planification d'une mise en végétation des talus des ZME au fur et à mesure du remblaiement ainsi que la pose de revêtement bitumineux sur les accès principaux du chantier sont aussi des facteurs importants du concept de lutte contre la formation de poussière.

Pour l'entreprise adjudicataire, des mesures complémentaires, visant à diminuer les émissions liées à la méthode d'exécution de certains travaux, font aussi partie de son cahier des charges. Parmi ces mesures il faut citer : l'arrosage incessant des pistes de chantier, l'humidification du marin sur les bandes transporteuses et l'arrosage des points de chutes des convoyeurs à bandes, la couverture des dépôts extérieurs de sable et l'arrosage des dépôts extérieurs de matériaux d'excavation. Il faut également noter que seule l'application rigoureuse de ces mesures complémentaires pour empêcher le développement de poussière permet de maintenir les retombées de poussière en suspension dans l'air aux niveaux des critères limites fixés par la réglementation en vigueur.

5.6. Stations de traitement des matériaux

Définition et prétraitement des matériaux extraits

Le tableau 5 présente pour quelques plates formes de travaux, les solutions retenues pour le traitement ainsi que les caractéristiques de matériaux traités :

	SEDRUN	BODIO	MITHOLZ	RAROGNE	MODANE
Type de Matériau					
Conventionnel	X		X	X	X
TBM		X		X	
Concassage en galerie	OUI		OUI	OUI (conv.)	OUI
Ø Max. mm	80	150	250 à 300	200	250
Scalpage					
Cl. 1		16mm		possible à 16 mm peu utilisé	possible à 16 mm peu utilisé
Cl. 2					
Traitement final	Correcteur de forme à axe horizontal. Extraction des micas par flottation	Correcteur de forme à axe horizontal	Impacteur à axe vertical		
Traitement des Boues	Filtre-presse	Filtre-presse		Décantation	Filtre-presse

Tableau 5 – Caractéristiques des matériaux traités

6. Valorisation

6.1. Granulats

Spécifications techniques, synthèse et références EN

Les exigences et les valeurs indicatives applicables aux granulats produits doivent donner à l'Entreprise chargée de la construction du tunnel les garanties nécessaires pour qu'elle puisse assumer ses responsabilités en ce qui concerne la fabrication des différentes qualités de béton entrant dans la construction de l'ouvrage.

Il y a lieu de stipuler dans l'accord portant sur la qualité, passé entre les Maîtres d'Ouvrage et les Entrepreneurs, que les Maîtres d'Ouvrage ont parfaitement rempli leurs obligations en tant que fournisseurs de matériaux et qu'ils ont respecté les exigences, tel que défini par le tableau 6 :

Tableau 6 - Plan de contrôle des granulats

Type d'essai	Norme d'essai	Indicateur à vérifier	Remarques
Essai Los Angeles	EN 1097-2	≤ 45 Gothard ≤ 35 Loetschberg	
Composants inadéquats au plan pétrographique: fractions 1/4, 4/8, 8/16, 16/22mm (sauf phyllosilicates libres)	Selon définition AlpTransit	≤ 5 [% pondéraux] ≤ 10	Valeur indicative Si 5-10%: essai d'aptitude du béton
Proportion de phyllosilicates: Sable grossier 1/4mm Sable fin 0/1mm (Indicateurs déterminés pour la fraction 0.25-0.5mm)	Selon définition AlpTransit	≤ 5 [% des pces] ≤ 35 [% des pces]	Valeur indicative Valeur indicative Si > 35% des pces: essai d'aptitude du béton
Distribution granulométrique	EN 933-1	Gothard : Gravillon: selon SN 670'130 Sable: selon définition AlpTransit Loetschberg : selon EN 12-620	L'exploitant de l'usine de gravier est responsable du respect des valeurs limites
Forme des grains	EN 933-3	≤ 35 Gothard ≤ 30 Loetschberg	L'exploitant de l'usine de gravier est responsable du respect des valeurs limites
Réactivité potentielle aux alcalins (RAG)	AFNOR P18-588	Considéré non réactif si expansion ≤ 0.11%. Réactivité maximale admise: exp. ≤ 0.20%	Si expansion > 0.11% : utilisation dans un béton de formulation plus stable vis-à-vis des RAG

Le non-respect des valeurs indicatives ne signifie pas forcément que le béton ne pourra pas atteindre les objectifs de qualité prescrits. Le cas échéant, il y a cependant lieu d'étudier l'incidence des valeurs excessives sur les propriétés du béton frais et du béton durci en procédant à des essais préliminaires et en contrôlant si le béton obtenu se prête bien à l'usage auquel il est destiné.

6.2. Caractéristiques des sites de traitement

		Capacité de Production t/h	Quantité à Produire kt	Surface disponible / Stockage		
				Cl. 1	Granulats	Total
GOTHARD	Bodio	250	2 300	15 000 m²	5 000 m²	20 000 m²
	Sedrun	90	1 800	15 000 m²	8 000 m²	23 000 m²
LOETSCHBERG	Rarogne	280	2 000	80 000 m²	20 000 m²	100 000 m²
	Mitholz	130	1 200	40 000 m²	10 000 m²	50 000 m²
MAURIENNE AMBIN	Modane (1)	140	300	5 000 m²	10 000 m²	15 000 m²

(1) Travaux de la descenderie uniquement

Tableau 7 - Caractéristiques des sites de traitement

Contractuellement les Maîtres d'Ouvrage sont liés aux entreprises des différents lots comme fournisseur de granulats. Cela signifie que les granulats fournis par les Maîtres d'Ouvrage doivent répondre aux mêmes critères qualitatifs que ceux appliqués à des granulats livrés par un fournisseur tiers. Les critères généraux sont ceux figurant sur le tableau 6.
Pour ne pas générer de situation conflictuelle avec les entreprises, les Maîtres d'Ouvrage doivent apporter la preuve que les agrégats livrés répondent aux critères qualitatifs prédéfinis. Les critères qualitatifs ont été fixés par des essais de convenances.

Les entreprises mandatées pour la valorisation sont responsables pour le respect des exigences qualitatives concernant la granulométrie et la forme des granulats. Les exigences pour les agrégats du béton projeté peuvent être différentes de celles pour les agrégats du béton coulé en place.

Dans certains cas, lorsque la composition minéralogique l'exige, des dispositions techniques tout à fait particulières ont dû être appliquées comme à Sedrun par exemple.

Sedrun Flottation

La teneur en mica du sable concassé est un paramètre crucial pour le traitement des matériaux cristallins extraits lors du creusement de tunnels. Les phyllosilicates libres (dégagés de la roche, non inclus dans celle-ci) qui entrent en contact avec l'eau de gâchage et avec le ciment exercent une influence négative sur les caractéristiques du béton frais comme du béton durci. Il faut d'autant plus d'eau de gâchage et de fluidifiant pour conserver l'ouvrabilité du béton frais que la teneur en mica est élevée. Et la présence de phyllosilicates libres provoque une diminution de la résistance mécanique et une augmentation de la perméabilité à l'eau du béton durci.
A Sedrun, les matériaux bruts sont principalement des gneiss extraits d'unités métamorphiques du massif intermédiaire du Tavetsch et du massif du Gothard. L'analyse d'échantillons de roche retirés dans les sondages profonds et dans le puits d'accès avait déjà révélé que la teneur en feuillets de mica libres, qui se concentrent principalement dans le sable 0/1 mm, revêtirait une importance cruciale et que la valeur indicative préconisée ne pourrait pas toujours être respectée. Cette valeur mesurée sur la fraction de référence 0.25-0.5 mm, s'élève à 35% du total du sable.

Le procédé d'extraction de mica utilisé actuellement à Sedrun consiste à réduire d'au moins 50% la teneur en phyllosilicates libres du sable concassé de granulométrie 0/1 mm, sans perdre pour autant une quantité excessive de sable fin (0.063/1 mm), composé de grains de quartz et de feldspath, afin que la courbe granulométrique des sables reste continue et régulière. Ce procédé fait appel à des produits chimiques sans danger. Son coût est significatif mais économiquement supportable car l'enjeu est important. Il s'articule autour d'installations destinées à:

- débourber les matériaux bruts
- extraire les micas par flottation (photo 8)
- déshydrater le sable "démicacé"
- déshydrater les matières flottées (micas)
- préparer et doser l'additif de traitement.

Photo 8 - Flottation

6.3. Caractéristiques de production – tableau 8

	SEDRUN	BODIO	RAROGNE	MODANE	
Coefficient de forme – EN 933-3				A	B
4 - 8 mm	25	6	11	9	14
8 - 16 mm	23	5	11	8	15
16 - 22 mm	23	5	7	8	10
Teneur en fines % < 0,063 mm	Sable 0/1 mm				
4 - 8 mm	0,5	-	0,3	0,6	0,2
8 - 16 mm	0,6	-	0,4	0,8	0,8
16 - 22 mm	0,6	-	0,3	0,6	0,3
Los Angeles EN 1097-2					
4 - 8 mm			24	x	x
8 - 16 mm	24	33	21	18	22
16 - 22 mm			19	x	x
Sable					
Nb. De Composants	2 (0/1 et 1/4 mm)	2 (0/1 et 1/4 mm)	1	1	1
% < 0,063 mm	5,0/1,0	9,2/	3,5	3	3
Module de Finesse	-	-	2,75	2,9	2,95
% produit	19/25	26/22	42	41	43
RAG					
Test Microbar	0,09	0,05	0,08	0,2	NR
Pétrographie: Composants inadéquats					
% Mica (Sable)	26.9 / -	31.2 / 0.7	7 ,7	0	0

A = Quartzite, B = Calcaire, NR = non réactif

6.4. Bétons

Le chapitre « Béton » ne sera pas développé dans cette présentation. Aucune difficulté majeure n'est actuellement rencontrée sur l'ensemble des chantiers en activité. Il faut toutefois mettre en évidence quelques paramètres pilotes qui conditionnent le bon déroulement des travaux de bétonnage :

- Le concept « béton » devrait être en permanence souple et adaptable et ne pas être figé dans un programme de formules testées et agréées avant le début des travaux pour permettre de suivre les éventuelles évolutions du gisement constitué par le tunnel. Cette disposition assouplit le fonctionnement des chantiers du Loetschberg et de Maurienne-Ambin.

- Les formulations des bétons devraient se rapprocher le plus possible des granulats produits (comme c'est le cas au Loetschberg et Maurienne-Ambin), ce qui permettrait de réduire la production de granulats excédentaires.

- Le phasage des travaux de bétonnage des tunnels devrait être adapté aux contraintes générales des chantiers. Le revêtement du tunnel effectué à l'avancement diminue les contraintes de stockage mais accentue la contrainte du « flux tendu » pour la production des granulats. Une campagne de revêtement décalée est probablement plus facile à gérer pour tous les acteurs, mais pour la réussir, il faut pouvoir disposer de la place suffisante comme c'est le cas à Rarogne.

- La durabilité : elle a été prise en compte sur tous les chantiers pour garantir une durée de vie de 100ans des ouvrages. La faible perméabilité et la grande facilité de mise en œuvre sont les tous premiers critères de durabilité. Tous les chantiers ont intégré la RAG et la résistance aux sulfates dans la formulation des bétons.

7. Paramètres déterminants

7.1. Coefficient de valorisation, valeur moyenne

Le tableau 9 met en évidence les performances réalisées sur 3 différents chantiers :

- BODIO où le traitement de matériaux extraits au tunnelier intégrant un scalpage à 16 mm fait considérablement chuter le coefficient de valorisation.
- RAROGNE qui est actuellement en pleine production avec en moyenne 3.500 t de granulats produits par jour. La performance réalisée sur ce site peut être considérée comme exemplaire.
- MODANE qui constitue pour le moment une démarche de validation industrielle du traitement des matériaux. Les chiffres indiqués dans le tableau correspondent au traitement des quartzites et du calcaire, dont les résultats sont satisfaisants.

Projets	Tronçons	Matériaux Cl. 1 - kt		Granulats	% utilisé	Coefficient
		Traités	Perte Scalp.	Produits kt	dans les bétons	de Valorisation
GOTHARD	**Bodio**	1.600	1.135	393	60	0,17
LOETSCHBERG	**Rarogne**	2 800	0	2 200	92	0,72
MAURIENNE AMBIN	**Modane**	120	0	102	86	0,73

Tableau 9

7.2. Aspects économiques

L'exemple du St. Gothard

En comparaison avec une solution alternative faisant appel à un approvisionnement extérieur par le marché local, il résultera en fin de chantier une économie de l'ordre de 67 mio d'euros, 40 mio étant à affecter à la suppression des frais d'évacuation des matériaux et 27 mio à l'élaboration des granulats.

L'exemple du Loetschberg

Une comparaison entre l'achat et la production de granulats par valorisation des matériaux d'excavation, sans tenir compte des coûts qui auraient été induits par la mise en ZME des matériaux effectivement valorisés, indique que la masse critique de granulats à produire pour que le Maître d'Ouvrage tire un bénéfice économique du processus de valorisation se situe, pour le projet du tunnel de base du Loetschberg sud (Rarogne), aux alentours de 1,350 mio de tonnes de granulats. L'utilisation totale de 1,985 mio de tonnes de granulats pour les besoins du projet permet ainsi, par la valorisation, une économie de 4,3 mio d'Euros. La prise en compte, dans cette comparaison, des coûts qui auraient été induits par la mise en ZME des matériaux effectivement valorisés porterait alors l'intérêt économique de la valorisation à sa juste valeur en abaissant le point mort à 0,7 ou 0,8 mio de tonnes avec une économie totale de l'ordre de 35 à 40 mio d'euros (figure 9)

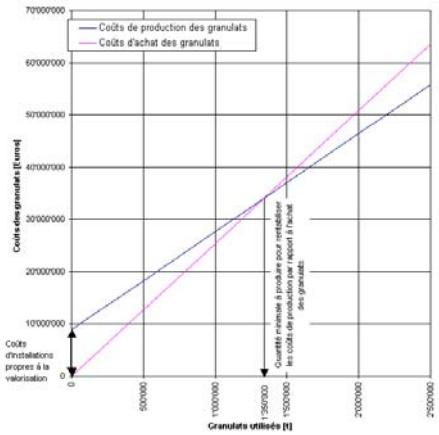

Figure 9 : Comparaison économique entre l'achat de granulats et la valorisation en granulats des matériaux d'excavation du Tunnel de base du Loetschberg (Rarogne).

8. Conclusion

Le concept de gestion des matériaux d'excavation des 3 ouvrages étudiés intègre l'ensemble des matériaux d'excavation du projet. Grâce à sa mise en oeuvre, l'approvisionnement des chantiers en granulats pour béton peut quasiment se faire de manière autonome. Ce concept global a reçu l'approbation des services et autorités compétentes aussi bien en Suisse qu'en France et en Italie, et fait partie intégrante des conditions d'approbation des projets. La gestion et la valorisation des matériaux d'excavation ainsi envisagées contribuent également à une diminution notable de l'impact sur l'environnement et à l'économie du projet.

Sa réussite ainsi vérifiée dépend pour une très large part de l'implication des Maîtres d'Ouvrage, de la très grande flexibilité et de la très grande adaptabilité des moyens mis en œuvre et surtout de la qualité et de la volonté des acteurs de considérer ce travail comme une véritable démarche industrielle d'envergure accompagnée des indispensables procédures de contrôle rigoureux.

Références

- *AlpTransit Gothard (2005) Information concernant le projet AlpTransit Gothard : www.alptransit.ch*
- *BLS AlpTransit, information concernant le projet du Loetschberg : www.blsalptransit.ch*
- *LTF-SAS, information concernant le projet Lyon-Turin : www.ltf-sas.com*
- *Keller F (2002) Gothardbasistunnel ; Geologie zwischen Prognose und Befund SIA tec21. Nr 14-15, 9.04.2002*
- *Thalmann C. (1996) : Beurteilung und Möglichkeit der Wiederverwertung von Ausbruchmaterial aus dem maschinellen Tunnelvortrieb zu Betonzuschlagstoffen Beträge zur Geologie der Schweiz, Geotechnische Serie, Lieferung 91, 1996 (ISBN 3-907997-24-7)*
- *Thalmann C. (2004) AlpTransit : exigences s'appliquant aux granulats à béton. Tracés n° 06, 17.04.2004*
- *Gemperli H.-P. und Schilter E. (2004) : Remblayages dans le lac d'Uri : un nouvel espace vital grâce à AlpTransit. Tracés n° 06, 17.04.2004.*
- *J. Pralong, C. Thalmann, P. Ritz, M. Zermatten, MBW und Beton – Loetschberg, bäsis Tunnel.*
- *X. Darmendrail, J. Rimey, L. Brino, J. Burdin – Liaison Lyon-Turin, une approche d'étude originale pour la valorisation des déblais de tunnels – TOS n° 176.*
- *J. Pralong, C. Thalmann, J. Burdin, Ausbruch Material Bewirtschlaftung/Beton Technologie – AlpTransit/FGU/SIA-THUN 2002.*
- *J. Burdin, LTF-TSE – Lot 3 – Ph II, Lyon Turin*
- *Antoine P., Fabre D., Coppola B., Fauvel P., Lacombe P., Le Mouel A., Ménard G., Ricard J. 1993. Reconnaissances pour le tunnel ferroviaire de base entre la France et l'Italie, Reith (ed) Proc. Int. Conf. Underground Transportation Infrastructures, Toulon, Balkema, Rotterdam, 87-91.*
- *Darmendrail X., Brino L., Monin N. Parisi ME, 2005. Nouvelle liaison ferroviaire Lyon-Turin : contraintes géologiques et différentes phases d'études de la partie commune franco-italienne. Géoline – Lyon 2005.*
- *Goy L., Fabre D., Ménard G., 1996. Modelling of rock temperature for deep alpine tunnel projects. Rock Mech n° 29(1), 1-18.*

Remerciements

Ont également contribué à la préparation de cette présentation :
Walter BENEDETTO et Xavier DARMENDRAIL, LTF –
Jean PRALONG, Bureau d'Ingénieurs, SION.

Crédit photos

- *ASE Technik SA*
- *LTF-SAS*
- *Ch. Carron, SRP*
- *Ernst Basler + Partner SA*
- *J. Burdin*

Auteurs

- *C. Thalmann BIG* cedric.thalmann@b-i-g.ch
- *C. Carron – SRP* c.carron@srp.ch
- *L. Brino – LTF* Lorenzo.brino@ltf-sas.com
- *J. Burdin – IGC* jburdin@icor.fr