

DEPARTEMENT FÜR UMWELT, VERKEHR, ENERGIE UND KOMMUNIKATION
BUNDESAMT FÜR STRASSEN

DEPARTEMENT FEDERAL DE L'ENVIRONNEMENT, DES TRANSPORTS, DE L'ENERGIE ET DE LA COMMUNICATION
OFFICE FEDERAL DES ROUTES

DIPARTIMENTO FEDERALE DELL'AMBIENTE, DEI TRASPORTI, DELL'ENERGIA E DELLE COMUNICAZIONI
UFFICIO FEDERALE DELLE STRADE

Utilisation des matériaux d'excavation de tunnels dans le domaine routier

Etat des connaissances actuelles

Verwendung von Tunnelausbruchmaterial
im Strassenbau

Stand der aktuellen Kenntnisse

Institut des sols, roches et fondations (ISRF)
de l'Ecole polytechnique fédérale de Lausanne

F. Descoeurdes, A.-G. Dumont, A. Parriaux, L. Vulliet,
M. Dysli, P. Robyr, M. Fontana, G. Franciosi,

Mandat de recherche 52/98

Version 4 – août 2006

Utilisation des matériaux d'excavation de tunnels dans le domaine routier

Etat des connaissances actuelles

Verwendung von Tunnelausbruchmaterial im Strassenbau

Stand der aktuellen Kenntnisse

**Institut des sols, roches et fondations (ISRF)
de l'Ecole polytechnique fédérale de Lausanne**

**F. Descoeurdes, A.-G. Dumont, A. Parriaux, L. Vulliet,
M. Dysli, P. Robyr, M. Fontana, G. Franciosi,**

Mandat de recherche 52/98

Version 3 – août 2006

Table des matières

RESUME.....	V
ZUSAMMENFASSUNG.....	VIII
1. Mandat	1
2. Problématique	3
Bibliographie	5
3. Caractéristiques géologiques et géomécaniques des formations traversées	7
3.1 Les principales formations géologiques de la Suisse	8
3.2 Eléments pétrographiques pour la réutilisation	9
3.3 Massifs rocheux.....	11
3.3.1 Jura.....	11
3.3.2 Plateau.....	11
3.3.3 Alpes	12
3.4 Terrains meubles	13
Bibliographie	17
4. Caractéristiques des matériaux excavés.....	19
4.1 Influence du mode d'excavation	20
4.1.1 Avancement traditionnel (explosif)	20
4.1.2 Avancement mécanique	20
4.2 Variabilité des caractéristiques du rocher en constructions souterraines	24
4.3 Granulométrie du matériau excavé.....	25
4.4 Foisonnement des matériaux d'excavation	28
4.5 Evaluation des matériaux excavés.....	29
4.5.1 Paramètres importants.....	29
4.5.2 Pétrographie	29
4.5.3 Dureté, résistance	29

Bibliographie	31
5. Traitements des matériaux excavés	33
5.1 Préambule	34
5.1.1 Utilisation de matériaux sans traitement préalable	34
5.1.2 Etudes géologiques préliminaires	35
5.2 Sélection du matériel réutilisable	36
5.3 Transports et dépôts	38
5.4 Concassage	39
5.4.1 Généralités	39
5.4.2 Types de concasseurs	39
5.4.3 Choix des installations	41
5.5 Criblage et lavage	44
5.6 Traitement des boues et déchets	46
5.7 Exemples d'installations de traitements	49
5.7.1 Tunnels de la traversée de Sierre (A9)	49
5.7.2 Tunnels de la N8 entre Interlaken et Brienzwiller	51
Bibliographie	53
6. Exigences pour l'utilisation	55
6.1 Généralités	56
6.2 Caractéristiques et essais	59
6.2.1 Caractéristiques des granulats et essais permettant de les déterminer	59
6.2.2 Caractéristiques mécaniques des sols et essais permettant de les déterminer	63
6.2.3 Caractéristiques des enrobés bitumineux et essais permettant de les	déterminer
6.2.3	66
6.3 Exigences en fonction de l'utilisation	68
6.3.1 Utilisation en remblais non sollicités	68
6.3.2 Utilisation en remblais routiers et ferroviaires	70
6.3.3 Utilisation dans les couches de fondations routières et ferroviaires	71

6.3.4	Utilisation dans les bétons bitumineux	74
6.3.5	Utilisation dans le béton et béton de ciment routier	77
6.4	Référence.....	79
7.	Etat de la pratique actuelle (résultats de l'enquête).....	81
7.1	Déroulement de l'enquête	82
7.1.1	Questionnaire préliminaire.....	82
7.1.2	Enquête	83
7.2	Résultats de l'enquête.....	84
7.2.1	Ouvrages étudiés.....	84
7.2.2	Situation géographique	85
7.2.3	Caractéristiques des ouvrages.....	86
7.2.4	Motivations	86
7.2.5	Utilisations réalisées	87
7.2.6	Méthodologies de la sélection des matériaux	90
7.2.7	Méthodologie des traitements.....	96
7.2.8	Bilan qualitatif	98
7.2.9	Commentaires généraux.....	101
7.3	Conclusion.....	103
	Bibliographie	103
8.	Synthèse et bases pour l'élaboration d'une méthodologie.....	105
8.1	Les étapes de la transformation des matériaux excavés en matériaux de construction.....	106
8.2	Géologie	108
8.2.1	Synthèse	108
8.2.2	Propositions pour l'établissement d'un guide méthodologique.....	109
8.3	Méthodes de sélection des matériaux excavés	110
8.3.1	Synthèse	110
8.3.2	Propositions pour l'établissement d'un guide méthodologique.....	111
8.4	Méthodes et installations de traitements	112
8.4.1	Synthèse	112

8.4.2 Propositions pour l'établissement d'un guide méthodologique.....	112
8.5 Méthodes d'évaluation des produits finis.....	114
8.5.1 Synthèse	114
8.5.2 Propositions pour l'établissement d'un guide méthodologique.....	114
8.6 Gestion des déchets	115
8.6.1 Synthèse	115
8.6.2 Propositions pour l'établissement d'un guide méthodologique.....	115

Préface

Remerciements

Nous n'aurions pu mener cette recherche sans la collaboration des interlocuteurs que nous avons rencontrés pour la réalisation de l'enquête dont les résultats sont donnés au chapitre 7 du présent rapport. Nous adressons nos plus vifs remerciements à MM. :

F. Bilger, Aggregat AG, Erstfeld

M. Giner, AJS SA, Neuchâtel

U. Haldimann, HCB AG, Zurich.

C. Heubi, Bonnard & Gardel ingénieurs conseils SA, Lausanne

A. Micotti, CETP SA, Pully

M. Odier, GADZ, Le Mont/Lausanne

A. L. Pralong, Dr Jean Pralong SA, Sion

M.-A. Robyr, DTEE, Service des Routes Nationales du Valais Romand, Sion

W. Steiner, Balzari & Schudel AG, Berne

C. Thalmann, B-I-G, Wabern

A. Waldmeyer, Service des Ponts et Chaussées du canton du Jura, Delémont

Résumé

Les réserves des gravières s'épuisent, les surfaces disponibles pour le stockage de matériaux minéraux s'amenuisent, on prend de plus en plus conscience de nos responsabilités et de notre devoir de laisser à nos descendants une planète "aussi propre que nous aurions nous-même voulu la trouver". Toutes ces raisons, alliées à l'importance toujours croissante du développement durable, font que lors de l'élaboration de projets de tunnels, la question du recyclage des matériaux excavés prend toujours plus d'importance.

Le présent rapport, auquel devrait être donnée une suite sous forme d'un guide de l'utilisation des matériaux d'excavation de tunnels en fonction de la géologie, de la méthode d'avancement et des solutions d'emploi envisagées, a pour but de donner un aperçu des recherches menées dans ce domaine, et des expériences réalisées en Suisse.

Dans ce qui suit, on trouvera tout d'abord un résumé des caractéristiques géologiques et géomécaniques des principales formations géologiques helvétiques. Le chapitre suivant traite des caractéristiques des matériaux excavés en fonction du mode d'avancement. Les traitements nécessaires à la fabrication de matériaux utilisables dans le domaine routier sont ensuite abordés, ainsi que les exigences définies dans les normes suisses pour les différentes utilisations possibles. Enfin, on donne un aperçu des expériences de valorisation des matériaux d'excavation de tunnels réalisées dans notre pays. Quatorze ouvrages particulièrement représentatifs des différentes formations géologiques traversées et des diverses méthodes de traitements expérimentées ont été sélectionnés pour faire l'objet d'une enquête afin de dégager les méthodologies imaginées pour la sélection des matériaux d'excavation (marin), les installations nécessaires à la transformation du matériau brut en produit fini, et les difficultés rencontrées lors de ces expériences.

Zusammenfassung

Die Naturkiesreserven schwinden dahin, die zur Verfügung stehenden Areale für Deponien von Mineralmaterialien verringern sich, und wir werden unserer Verantwortung ebenso wie unserer Pflicht immer bewusster, die Erde „so sauber unseren Kindern zu hinterlassen, wie wir sie aufgefunden hätten wollen.“ Alle diese Gründe, mit der immer grösseren Wichtigkeit der dauerhaften Entwicklung verbunden, haben zur Folge, dass die Wiederverwertung des Tunnelausbruchsmaterials immer wichtiger wird.

Ziel dieses Berichtes ist es, einen Überblick über die in diesem Bereich geführten Forschungen und über die in der Schweiz gemachten Erfahrungen zu geben. Ein „Tunnelausbruchsmaterialverwertungshandbuch“ sollte dieser Studie folgen.

Im ersten Teil dieses Berichtes sind die geologischen und geomechanischen Eigenschaften der geologischen Hauptformationen zusammengefasst. Danach werden die Eigenschaften des Ausbruchsmaterials entsprechend der Vortriebsmethode behandelt. Anschliessend werden die Aufbereitungsbehandlungen und –installationen für die Erstellung von Strassenbaumaterialien angesprochen, sowie die Anforderungen der schweizerischen Normen für ihre verschiedenen möglichen Verwendungen. Schlussendlich stellen wir einige schweizer Erfahrungen bei der Wiederverwertung von Tunnelausbruchsmaterialien vor. Hierfür wurden 14 besonders typische Tunnel für die verschiedenen durchgefahrenen geologischen Formationen und für die diversen Behandlungsmethoden ausgewählt, um eine Untersuchung durchzuführen. Mit dieser Untersuchung wurden die diversen Methoden der Ausselektionierung des Ausbruchsmaterials, die verschiedenen Behandlungsinstallationen und die Hauptschwierigkeiten der Materialaufbereitungserfahrungen aufgezeigt.

Summary

1. Mandat

En Suisse, ces 10 à 15 prochaines années, quelque 80 millions de m³ de déblais seront extraits des tunnels nécessaires à l'achèvement du réseau des routes nationales, à Rail 2000 et aux nouvelles lignes ferroviaires alpines (NLFA). De par la loi sur l'environnement et dans l'optique du développement durable, ces déblais ne pourront être mis en décharge que partiellement; leur utilisation dans le domaine du génie civil est ainsi quasiment obligatoire.

En dehors d'une utilisation limitée pour le tunnel d'où ils proviennent, ces déblais devront être utilisés pour d'autres ouvrages. La construction routière pourrait probablement absorber l'essentiel du volume extrait non utilisé sur place. Le cas des tunnels en rocher forés au tunnelier, dont la mise en œuvre devient aujourd'hui prépondérante, pose des problèmes spécifiques d'utilisation des déblais à cause de la forme défavorable (éclats) et de la granulométrie discontinue du matériaux excavé.

L'Institut des sols, roches et fondations de l'Ecole polytechnique fédérale de Lausanne projetait initialement de conduire un projet de recherche visant à élaborer un guide pour élaborer des méthodologies d'utilisation des matériaux en fonction du mode d'excavation et de la géologie rencontrée. Les crédits alloués finalement ne permettent pas de réaliser cet ambitieux projet, mais uniquement de faire un état des connaissances actuelles sur ce vaste sujet.

Le but de la recherche est donc de :

- établir un état des connaissances actuelles en la matière, basé notamment sur :
 - la nature géologique des massifs excavés,
 - les caractéristiques mécaniques des déblais compte tenu du mode d'excavation,
 - les méthodologies utilisées pour les essais nécessaires à la caractérisation des déblais, les critères et les tests pour le traitement éventuel des matériaux.
- dégager les solutions d'emploi les plus intéressantes déjà réalisées ou envisagées, selon une présentation tenant compte des critères ci-dessus et des méthodes de mise en œuvre en fonction du réemploi choisi.

Enfin, cette étude devrait servir de base, dans une phase ultérieure, à la rédaction d'un guide, à l'usage des maîtres d'ouvrages, des projeteurs et des entrepreneurs, décrivant, pour les conditions géologiques rencontrées en Suisse, la méthodologie et les différentes solutions possibles d'emploi des matériaux excavés.

2. Problématique

La signification écologique et économique du recyclage des matériaux de construction a fortement progressé ces dernières années. De plus en plus souvent, des déchets sont « anoblis » au moyen de procédés de traitement modernes en nouveaux matériaux de construction ou en produits semi-finis, pour devenir ce qu'on peut appeler des matières premières secondaires. Les déchets chargent l'environnement ; ils doivent par exemple être transportés et exigent des lieux de décharge coûteux. L'espace à disposition pour ces dépôts est de plus en plus restreint en raison de facteurs environnementaux (protection de la nature et du paysage, protection des eaux, surcharge de l'environnement bâti). Parallèlement, les réserves de matériaux exploitables s'amointrissent, d'une part en raison de l'épuisement des stocks, et d'autre part à cause des mêmes limitations écologiques d'exploitation. En même temps, les coûts d'exploitation des matériaux et les coûts de mise en décharge augmentent. La réutilisation des matériaux appropriés pour faire des matières premières secondaires amène ainsi des économies tant sur les volumes de dépôts que sur les besoins en matériaux : elle est écologiquement justifiée et économiquement toujours plus intéressante. La quantité totale des déchets recyclables en Suisse représente environ 12 Mio de tonnes ou 10 Mio de m³ par an, ce qui équivaut à 4 fois la pyramide de Kheops. La répartition de ces déchets selon l'origine de production est donnée à la Figure 2-1.

Erreur! Liaison incorrecte.Figure 2-1 : Répartition des déchets recyclables en Suisse (1994), tiré de Kündig et al., 1997.

Selon la loi sur l'environnement du 7 octobre 1983, les déchets sont définis comme suit (art. 6) : « choses meubles dont le détenteur se défait ou dont l'élimination est commandée par l'intérêt public ». Au sens légal, les matériaux d'excavation de tunnels font donc partie des déchets de chantier. La question de leur valorisation en matériaux nobles (l'élimination comprend la valorisation et non seulement le stockage) selon l'art. 6_{bis} de la loi sur l'environnement, tels que graves de fondations routières ou agrégats pour la fabrication de béton de ciment ou de béton bitumineux, ne se pose que depuis peu de temps. Il ne pouvait en effet y avoir de concurrence économique avec les graviers alluvionnaires tant que ces derniers semblaient inépuisables. Depuis quelques années cependant, la perspective du tarissement des réserves a conduit à la recherche de matériaux de substitution [Jäckli, Schindler, 1986]. Parmi ceux-ci, les matériaux extraits lors de la construction de tunnels pourraient jouer un rôle important. Par exemple, on estime que lors du percement des Nouvelles Lignes Ferroviaires Alpines (NLFA), environ 1/3 des matériaux excavés (au total environ 40 Mio. t) pourraient servir de matériau de construction pour le projet lui-même et pour des projets extérieurs. Cela

veut dire que pendant la durée des travaux, 5 à 10% des besoins annuels de gravier en Suisse (1995 environ 50 Mio. t) pourraient être couverts avec ces matériaux [Kündig et al., 1997].

Bibliographie

JÄCKLI, H. & SCHINDLER, C. (1986): *Möglichkeiten der Substitution hochwertiger Alluvialkiese durch andere mineralische Rohstoffe* - Beiträge zur Geologie der Schweiz, Geotechnische Serie, 68

KÜNDIG, R. et al. (1997): *Die Mineralischen Rohstoffe der Schweiz* - Schweizerische Geotechnische Kommission

3. Caractéristiques géologiques et géomécaniques des formations traversées

Chapitre en cours de rédaction chez GF, vous sera transmis lundi matin.

3.1 Les principales formations géologiques de la Suisse

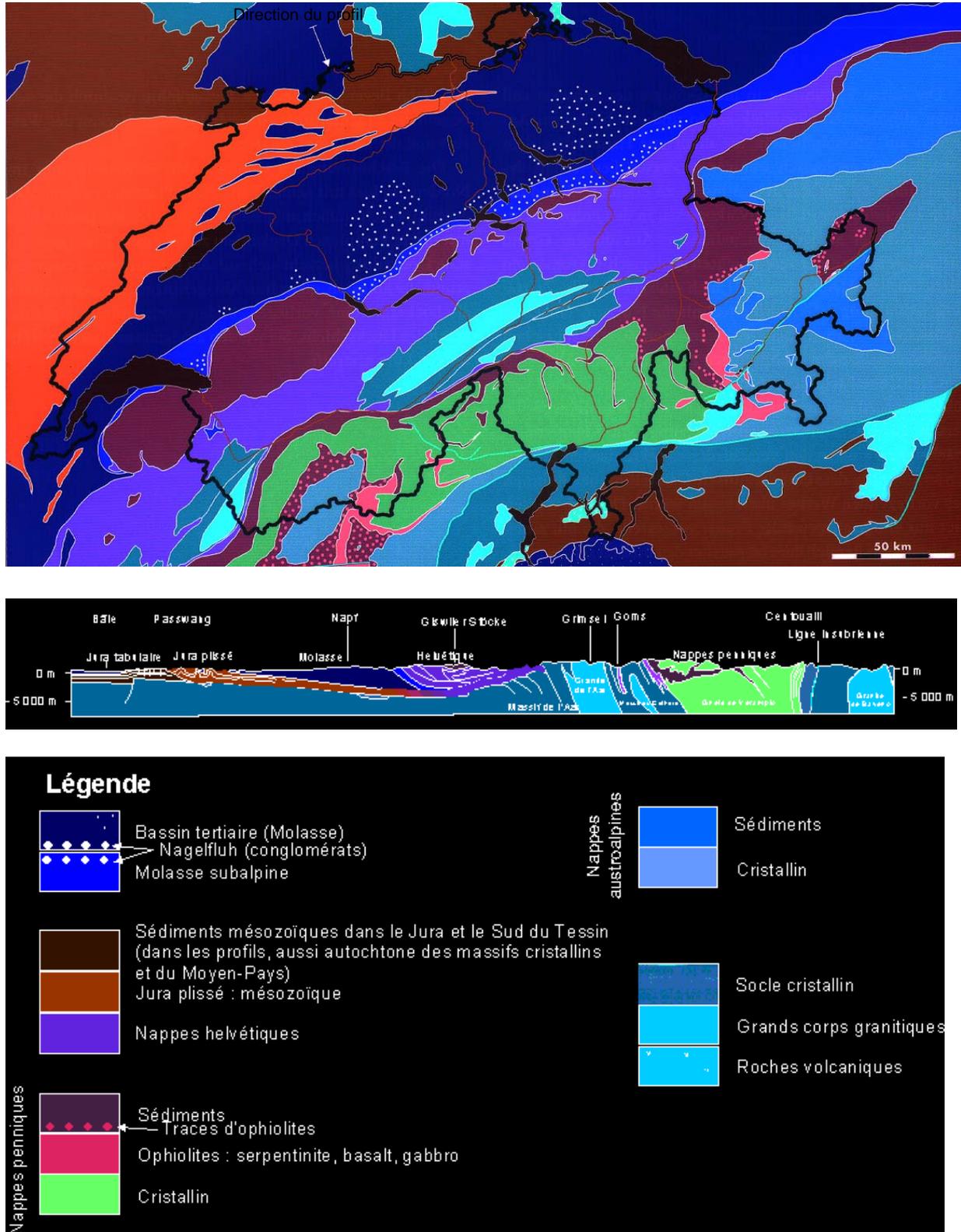


Figure 3-1 : carte et profil géologiques de la Suisse

3.2 Eléments pétrographiques pour la réutilisation

a) Roches magmatiques et métamorphiques

Roches principales : granite, syénite, diorite, gabbro, basalte, gneiss, amphibolite, quartzite, marbre, micaschistes.

Hormis les micaschistes, toutes les roches magmatiques et métamorphiques peuvent être réutilisées, à condition qu'elles soient suffisamment dures et saines, dans le domaine de la construction. Les micaschistes sont généralement à proscrire pour tous les types d'utilisation mentionnés dans ce rapport.

On donne au tableau suivant les minéraux principaux constituant les roches magmatiques et métamorphiques, leurs caractéristiques et leurs limites d'utilisation.

Minéraux	Caractéristiques	Limites d'utilisation, remarques
Quartz	SiO ₂ cristallisée	
Tridymite Cristobalite	SiO ₂ cristallisée à haute température	Béton : dangereux car ils réagissent avec les alcalis du ciment en donnant des produits expansifs
Calcédoine	Variété fibreuse et crypto cristalline de SiO ₂	
Opale	Gel amorphe de SiO ₂ hydratée	
Feldspaths	Alumino-silicates de Na, K, Ca	Béton : sensibles à l'altération, ils donnent naissance, en présence d'eau, à des minéraux argileux (kaolinisation)
Micas Chlorites	Alumino-silicates hydratés de K, Na, Fe et Mg	Tendres et clivables
Amphiboles Pyroxènes	Silicates complexes ferro-magnésiens et calciques	
Zéolites	Aluminon-silicates hydratés de Na, K, Ca, Ba	Béton : réagissent avec les alcalis du ciment
Pyrite	FeS ₂	Béton : peut s'oxyder en libérant H ₂ S ₄ et donner naissance à des hydroxydes de fer ainsi qu'à des sulfates (gonflements) ; certaines variétés sont également réactives avec les alcalis du ciment

Figure 3-2 : Minéralogie des roches magmatiques et métamorphiques

b) Roches sédimentaires

Roches principales : les roches principales et leurs limites d'utilisation sont données dans le tableau suivant.

Roches	Limites d'utilisation, remarques
Calcaire Calcaires siliceux Grès siliceux Grès calcareux Dolomies	Conviennent lorsqu'ils sont suffisamment durs et compacts pour l'utilisation prévue, et qu'ils sont dépourvus de matrice argileuse (béton, enrobés bitumineux)
Grès argileux Grès tendres Calcaires argileux Calcaires tendres Marnes Schistes Argilite	A exclure dans le béton car ils sont poreux et sensibles à l'eau

Figure 3-3 : Principales roches sédimentaires

Les minéraux décrits à la Figure 3-2 sont également présents dans les roches sédimentaires. Le tableau suivant donne un aperçu des autres minéraux principaux présents dans ces roches.

Minéraux	Caractéristiques	Limites d'utilisation, remarques
Calcite Dolomite	CaCO_3 $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$	Constituants essentiels des roches carbonatées
Minéraux argileux : - Illites - Kaolinites - Chlorites	Silicates d'alumine hydratés de K, Na, Ca, Mg, ...	Il s'agit de particules très petites (< 0.002 mm), constituants essentiels des argiles et des schistes, dangereux dans le béton à cause des changements de volume consécutifs aux cycles hydratation – séchage
Montmorillonite		
Gypse Anhydrite	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ CaSO_4	Constituants à proscrire dans le béton car ils réagissent avec le A_3C du ciment

Figure 3-4 : Minéralogie des roches sédimentaires

REMARQUES CONCERNANT L'UTILISATION DANS LE BETON

1. Dans les grès, la matrice ou ciment peut être du quartz, de l'opale, de la calcite, de la calcédoine, de la dolomite, de l'argile, ... et influencer ainsi considérablement la qualité du granulat.
2. Les silex, cherts et jaspes, roches siliceuses cryptocristallines très dures, peuvent réagir avec les alcalis du ciment, de même que la dolomite dans certaines roches carbonatées (calcaires et dolomies).

3.3 Massifs rocheux

3.3.1 Jura

Dans le Jura, les matériaux utilisables dans le domaine routier se limitent aux calcaires, marginalement des dolomites. Le caractère marneux de certains calcaires jurassiens est favorable à une utilisation dans des chaussées non revêtues, mais limite leur mise en œuvre comme matériau de fondation en raison de leur forte gélivité. Les marnes peuvent être utilisées pour la fabrication de clinker (ciment).

En général, les calcaires du Jura sont impropres à la fabrication de ballast ferroviaire, de couches d'usure (manque de résistance à l'abrasion) ainsi que de granulats pour bétons spéciaux. En revanche, ce sont ordinairement de bons matériaux de remplacement pour des bétons normaux ou à haute résistance ainsi que pour des couches de support de revêtements hydrocarbonés (bonne adhérence au bitume). Leur résistance à la compression varie généralement entre 100 et 170 N/mm², avec un maximum autour de 200 N/mm².

On donne à l'annexe 1 un profil typique du Jura. Les caractéristiques mécaniques associées aux différentes roches proviennent d'une banque de données du laboratoire de mécanique des roches de l'EPFL, rassemblant les résultats de nombreux sondages effectués pour la plupart en Suisse romande. Certaines des données de ce tableau pouvant influencer la décision de procéder ou non à une réutilisation des matériaux excavés, nous espérons dans une étape ultérieure (établissement d'un guide méthodologique pour l'utilisation) pouvoir étendre cette étude aux autres régions helvétiques.

3.3.2 Plateau

Le sous-sol du Plateau suisse est essentiellement composé de molasse, soit de sédiments jeunes issus de l'érosion lors de la formation des Alpes. La molasse a une grande importance pour de nombreuses utilisations. Les sables et calcaires coquilliers sont extraits depuis des siècles dans de nombreuses carrières pour les utiliser dans la construction. Les Nagelfluh (conglomérats) servaient et servent toujours dans les couches de fondation de routes ou comme agrégats à béton de ciment ou bitumineux. L'industrie de la construction utilise également beaucoup de sables. Enfin, la marne et les argiles molassiques sont utilisés en briqueteries.

3.3.3 Alpes

La grande diversité lithologique des Alpes est en rapport avec la complexité de la tectonique. Le secteur alpin a une grande importance dans l'exploitation de la roche en place, principalement de calcaires et grès alpins. La formation de fortes schistosités dégrade souvent les propriétés techniques du matériau. Mais des roches mi-dures, en particulier des calcaires, sont utilisables. Ceux-ci présentent souvent une plus grande résistance à la compression que les calcaires jurassiens, en raison de leur histoire tectonique. L'utilisation des matériaux sédimentaires alpins peut être techniquement fortement limitée par des gisements de marne dans les calcaires, ou par des dépôts schisteux, respectivement argileux. Les roches magmatiques sont moins facilement exploitables, leur utilisation comme couches de fondation ou graviers étant limitée par de grandes proportions de micas ou de Feldspaths non liés.

Les principales roches utilisables dans les **massifs centraux** (massifs de l'Aar, du Gothard, du Mont-Blanc et des Aiguilles Rouges) sont les granites, et éventuellement divers gneiss et pierres olaires.

Une grande surface, liée aux massifs centraux, au Nord-Ouest de ceux-ci, est couverte par les **nappes helvétiques**. On y trouve des sédiments mésozoïques, tertiaires et permien. Les roches de l'Helvétique peuvent être valorisées en très bons matériaux pour la construction de routes.

Les Alpes valaisannes au Sud du Rhône, les montagnes tessinoises et l'ouest des Grisons, ainsi que la fenêtre de l'Engadine forment les **nappes penniques**. Contrairement à l'Helvétien, on y trouve également des formations cristallines. Les matériaux réutilisables dans ces régions sont des gneiss, ainsi que la quartzite, le marbre, la dolomite, la serpentinite, et les grès.

Dans le massif des **Alpes du sud**, on peut réutiliser comme matériaux de construction la porphyrite, la dolomite, ainsi que différents calcaires et marnes.

3.4 Terrains meubles

Les possibilités d'utilisation des terrains meubles dépendent principalement de leur teneur en éléments tendres et de leur granulométrie. On donne ici une classification géologique des terrains meubles ainsi que leur classification USCS. La Figure 3-5 montre les caractéristiques géotechniques de certains terrains meubles helvétiques, issues d'essais réalisés sur près de 5 000 échantillons provenant de toute la Suisse romande.

Symb.	Désignation	Anc. Class. USCS	Nouv. Class. USCS	Class.	w _L [%]	I _p [%]	ρ [t/m ³]	w [%]	e ₀ [-]	Φ' [°]	c' [kN/m ²]	c _u [kN/m ²]	C _c [-]	C _s [-]
R	Remblai													
T	Terre végétale, Humus													
U	Sous-couche													
C	Colluvions	SC-CL	SC											
		SM-ML	SM											
		ML	ML											
B	Eboulement													
G	Eboulis													
A	Alluvions	GM	GM											
		SM-ML	SM											
		ML	ML											
A _f	Alluvions fluviales													
A _c	Cône de déjection													
A _t	Alluvions torrentielles													
A _d	Alluvions de delta													
A _g	Alluvions fluvioglaciaires													
A _l	Sédiments lacustres	SM-ML	SM											
		ML	ML											
A _s	Sédiments glaciolacustres													
K	Craie lacustre													
O	Horizon organique													
L	Loess													
M	Moraine													
M _l	Moraine latérale													
M _f	Moraine de fond	GM	GW-GM, GP-GM											
		GC-CL	GC											
		SC-CL	SC											
		SM-ML	SM											
		ML	ML											
		CL	CL											
M _a	Moraine aquatique	GC-CL	GC											
		SC-CL	SC											
		CL	CL											
E	Eluvion													
V	Roche altérée													

Figure 3-5 : Caractéristiques mécaniques de terrains meubles

Les matériaux meubles réutilisables dans la construction sont principalement les alluvions fluvio-glaciaires, les moraines (principalement de fond et aquatique), les alluvions torrentielles, les colluvions et les éboulis [Jäckli, Schindler, 1986]. Ces types de sols peuvent être utilisés comme remblais routiers ou ferroviaires et dans des chaussées non revêtues, souvent sans traitements particuliers. Pour une utilisation comme graves de fondation non gélives, il est par contre en général nécessaire de les laver et de recomposer la granulométrie, principalement en ce qui concerne les moraines. Ces matériaux peuvent également fournir des granulats à béton de bonne qualité. Des granulats à bétons bitumineux peuvent aussi être fabriqués à partir de ces matériaux, à condition de les sélectionner sévèrement et d'avoir recours aux traitements adéquats.

Bibliographie

ALOU, F. (?) : *Matériaux de construction* - cours EPFL

4. Caractéristiques des matériaux excavés

4.1 Influence du mode d'excavation

Les ouvrages souterrains sont aujourd'hui excavés soit traditionnellement à l'explosif, soit mécaniquement au moyen d'outils de forage à pleine section (tunneliers : « Tunnel Boring Machine » ou TBM, Figure 4-1) ou à section partielle (machines à attaque ponctuelle ou haveuses, Figure 4-5). Les caractéristiques du matériau excavé en fonction du mode d'excavation ont été décrites dans THALMANN, 1996.

4.1.1 Avancement traditionnel (explosif)

Les caractéristiques des granulats excavés à l'explosif dépendent d'une part de la quantité d'explosif utilisée, et d'autre part des discontinuités du massif rocheux et des contraintes initiales. Contrairement aux extractions à ciel ouvert pour la fabrication de gravier concassé, de grandes quantités d'explosif sont utilisés dans la construction d'ouvrages souterrains. Les fragments rocheux ainsi obtenus présentent, selon les propriétés du rocher en place et la technique d'excavation, des microfissures qui amoindrissent la résistance de la roche.

Le développement actuel des méthodes d'abattage fait que les matières explosives prennent de plus en plus la forme d'émulsions ou de gels. La quantité d'explosif va vers un accroissement, ce qui engendre une diminution de la taille maximale des grains du matériau extrait traditionnellement, et une augmentation de la fraction fine du marin.

4.1.2 Avancement mécanique

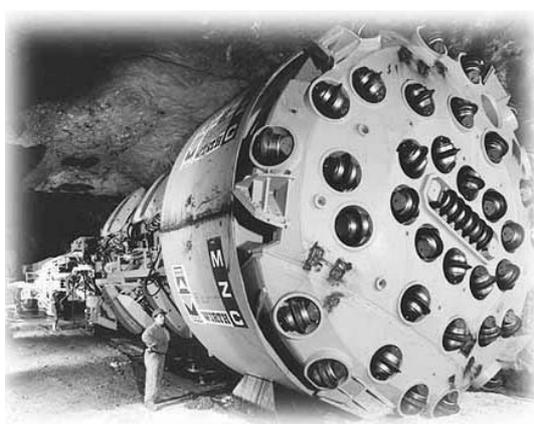


Figure 4-1 : tête de forage d'un tunnelier
(Cleuson-Dixence)

La tête de forage d'un tunnelier pleine section est équipée de nombreux outils de coupe discoïdes (molettes) espacés radialement d'environ 30 à 100 mm. La tête de forage pénètre dans la roche de 5 à 30 mm par tour de roue du tunnelier. Une pression pouvant atteindre 15 à 35 t est exercée sur chaque outil, lesquels roulent en cercles concentriques autour de l'axe de rotation de la tête de forage. Au point de contact, l'outil broie la roche et creuse un sillon; en outre, des fissures radiales se forment par cisaillement à la surface du front (Figure 4-2).

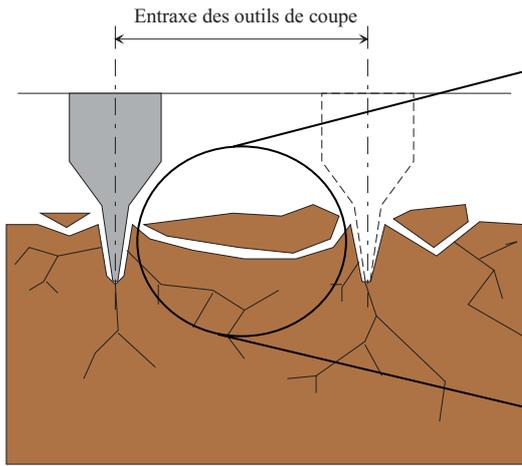


Figure 4-2 : Formation des chips
(adapté de THALMANN, 1996)

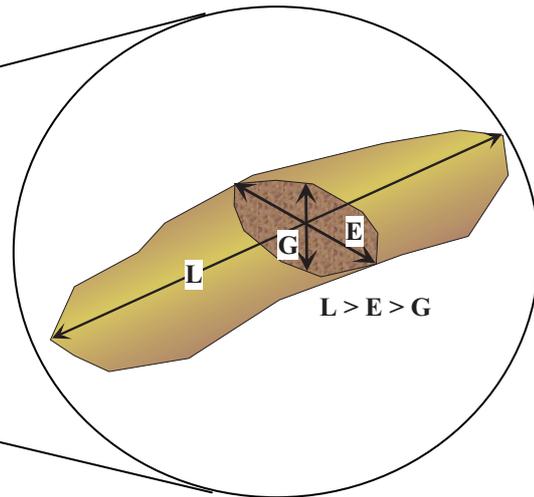


Figure 4-3 : Définition des axes principaux
(adapté de THALMANN, 1996)

Lorsque les fissures de deux sillons se rejoignent, la roche éclate sous forme de "chips". Avant la formation de ces chips, des fragments de roche plus importants peuvent se détacher; en particulier dans les roches anisotropes (roches crevassées, zones disloquées, surfaces de discontinuité), des blocs nettement plus grands peuvent se former (leur dimension maximale dépasse parfois 500 mm). Les chips produits par les tunneliers actuels ont 100 à 300 mm de longueur (L), 55 à 70 mm d'épaisseur (E) et 15 à 25 mm de grosseur (G) (voir la définition des axes à la Figure 4-3).

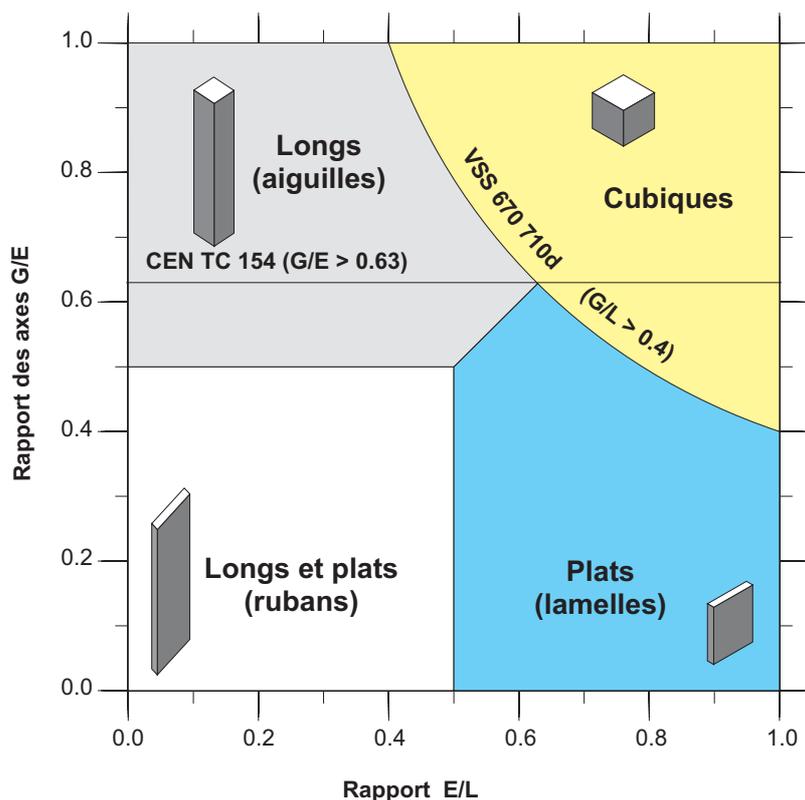


Figure 4-4 : Forme des grains - exigences selon normes CEN et VSS.

La dimension maximale des chips dépend de nombreux facteurs, mais c'est l'espacement des sillons qui est déterminant. L'influence de cet espacement est donné à la Figure 4-8 et à la Figure 4-9. Les expériences actuelles ne permettent pas de dégager de corrélation entre la pression exercée sur le rocher et l'épaisseur des chips. La rugosité de la surface et les arêtes anguleuses des grains sont également typiques des excavations au tunnelier. Des tendances certaines concernant la forme des grains peuvent être identifiées non seulement pour les matériaux bruts, mais également pour les granulats préparés : les matériaux d'excavation de plus de 8 mm de diamètre présentent généralement un rapport d'axes G/E inférieur à 0.5 et sont par conséquent plutôt plats. Le rapport G/E des fractions inférieures à 8 mm a tendance à augmenter, et ces granulats se rapprochent des formes allongées et cubiques selon les définitions de la Figure 4-4. En général, à la diminution de la dimension des grains correspond une augmentation des rapports G/E et G/L et une diminution du rapport E/L. Plus le diamètre des grains est petit, plus leur forme est trapue et cubique.



Figure 4-5 :Haveuse en action [BRÄNDLI ET AL., 1990].

L'utilisation de machines à attaque ponctuelle est économiquement intéressante dans des roches peu dures, dont la résistance à la compression est inférieure à 100 N/mm^2 . Ces machines font des saignées dans le rocher. Les grains ainsi produits ont une forme plus cubique que celle des éclats résultant de l'avancement au tunnelier pleine section. Leur répartition granulométrique est également différente (cf. § 4.3).

4.2 Variabilité des caractéristiques du rocher en constructions souterraines

Contrairement aux carrières, où une qualité constante du matériau est garantie sur la base de conditions géologiques sélectionnées dans un but bien précis, des matériaux différents peuvent être excavés dans un court intervalle de temps en tunnel. Des modifications de la qualité du matériau peuvent être induites par des changements de la pétrographie, par la traversée de zones dérangées, par des rapides variations de la dureté de la roche. Il peut arriver qu'à l'intérieur d'une section de tunnel des matériaux réutilisables soient mêlés à des matériaux inexploitable. C'est pourquoi la classification des matériaux excavés selon des critères de qualité prédéfinis pose avant tout un problème logistique et technique pour les essais. Ainsi, un mécanisme de contrôle efficient - qui ne doit pas influencer négativement l'avancement - doit garantir que des écarts de la qualité exigée soient immédiatement perçus. De cette manière le triage in situ entre matériau utilisable et inutilisable pourra être réalisé.

4.3 Granulométrie du matériau excavé

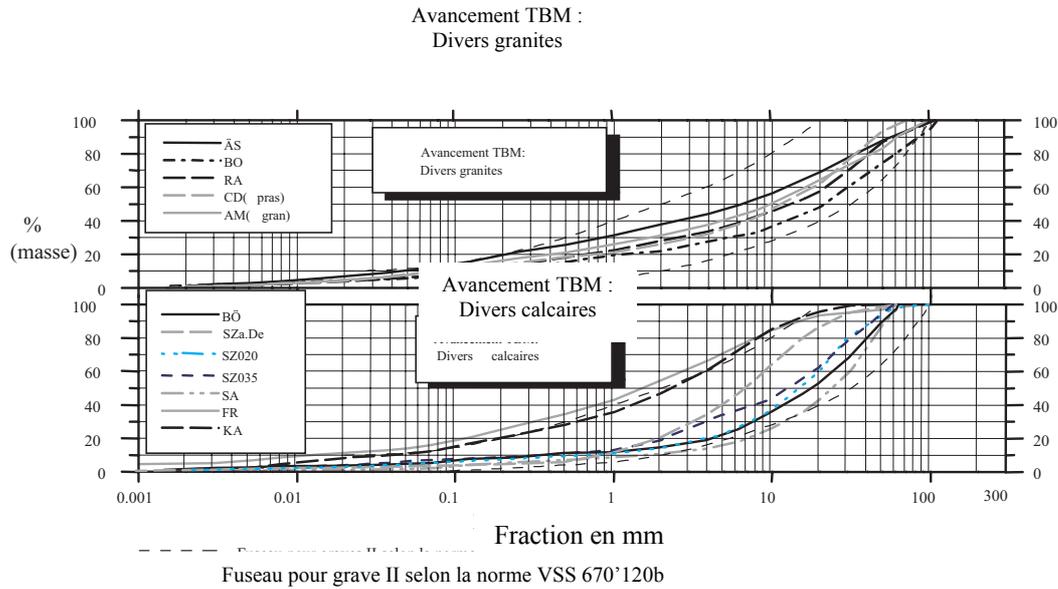
On donne à la Figure 4-6 des exemples de granulométries pour différentes méthodes d'avancement, tirées d'essais (n = nombre d'essais). Les valeurs pour un tunnelier avec modifications de l'espacement résultent de tests effectués en Suède, pour lesquels on a supprimé progressivement des outils de coupe pour modifier l'espacement des sillons [THALMANN, 1995].

Dans les matériaux excavés à l'explosif, les fractions depuis l'argile jusqu'aux graviers moyens (jusqu'à 20 mm) sont sous-représentées. 85 à 95% des composants ont un diamètre supérieur à 30 mm, et sont par conséquent bien transformables. La présence de gros éléments (diamètre supérieur à 500 mm) dépend fortement de la quantité d'explosif utilisée. Les développements actuels des explosifs tendent à réduire la taille des éclats produits, ce qui facilite également les travaux de marinage. Cette réduction peut cependant influencer le choix des installations de traitements, plus particulièrement pour les opérations de pré-concassage.

Méthode d'avancement	n	Ecartement des outils de coupe [mm]	0-0.02 [mm]	0-4 [mm]	> 30 [mm]	> 100 [mm]
			Composition en % de la masse			
Traditionnel (explosif) (roches cristallines)	2	-	0 – 1	2 – 5	85 – 95	75 – 85
Haveuse (calcaires du Jura)	14	-	5 – 15	15 – 40	5 – 40	0 – 5
Tunnelier (sédiments, plutonite, métamorphite)	35	70 – 85	5 – 10	20 – 50	20 – 45	0 – 5
Tunnelier avec modifications de l'espacement (plutonite)	1	86	10	45	20	0
	1	129	5	40	30	5
	1	172	2.5	20	35	15
CMM (« continuous minning machine ») (grès)	1	-	0 – 1	15 – 20	65 – 75	45 – 60

Figure 4-6 : Influence de la méthode d'avancement sur la granulométrie du marin (tiré de THALMANN, 1995)

Les analyses granulométriques (Figure 4-7) montrent que le matériau excavé lors d'avancements mécaniques (TBM et haveuses) est souvent compris dans le fuseau des courbes enveloppes pour la grave II (selon la norme SN 670 120, « graves pour couches de fondation, exigences de qualité »). La part de la fraction inférieure ou égale à 0.02 mm représente environ 1 à 10 % du poids total.



Abréviations : ÄS : Äspö Suède, Granodiorite; BO : Bozen Italie, Quarzporphyre; RA : Randa, Gneis; CD : Cleuson-Dixence, Prasinite; AM : Amsteg, Granite et Chlorit-Serizit-Gneis; BÖ : Bözberg, calcaire; SZ : Sonceboz, calcaires; SA : Sachseln, calcaires; FR: Frutigen, calcaires; KA : Kandersteg : calcaires.

Figure 4-7 : Courbes granulométriques de divers avancements au tunnelier, adapté de THALMANN, 1996

La part des granulats avec un diamètre moyen E supérieur à 30 mm représente pour le matériau extrait par tunnelier une part massique de 5 à 55%, et pour le matériau extrait par haveuse de 5 à 40%. La part de composants avec un diamètre minimal G supérieur à 30 mm est quant à elle inférieure à 10% lors d'avancement au TBM et inférieure à 5% pour des avancements avec des machines à attaque ponctuelle. La quantité de grains grossiers (> 30 mm) est plus importante dans des massifs géologiquement anisotropes comportant des failles et des zones fortement stratifiées. Dans ce cas, en fonction de l'angle d'attaque entre l'axe du tunnel et les irrégularités du rocher, il peut se détacher des blocs de rocher plus grands. Des essais menés en Suède ont montré que la distance entre les outils de coupe des tunneliers n'influence pas seulement la taille des granulats (Figure 4-8), mais également leur répartition (Figure 4-9).

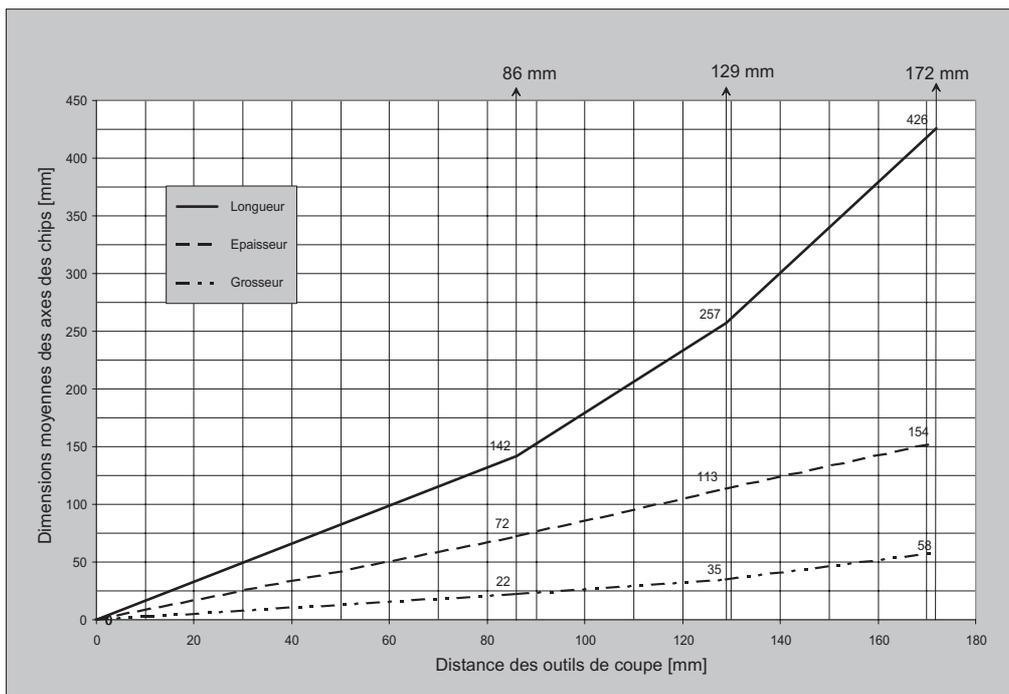


Figure 4-8 : Influence de la distance des outils de coupe sur les axes principaux des chips. Tiré de THALMANN, 1996.

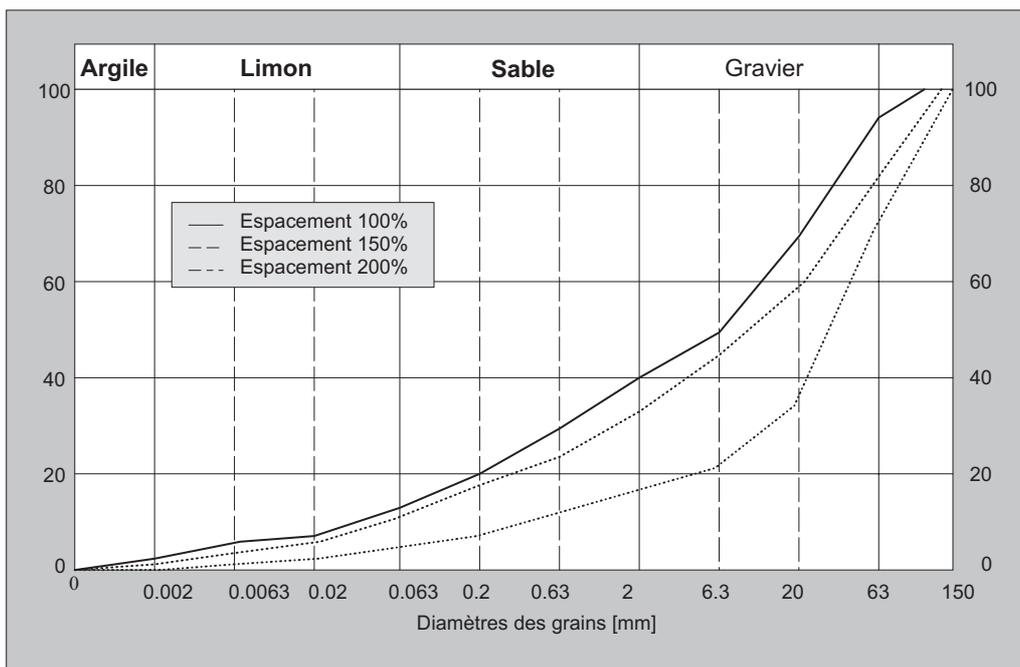


Figure 4-9 : Courbes granulométriques pour différents écartements d'outils de coupe. Tiré de THALMANN, 1996.

4.4 Foisonnement des matériaux d'excavation

Lors de l'extraction de la roche, il résulte une augmentation sensible du volume du matériau excavé par rapport au volume de la roche en place. Le coefficient de foisonnement dépend du type de roche, de la répartition granulométrique, de la forme des granulats, de la teneur en eau et du mode de mise en place (avec ou sans compactage). Les coefficients de foisonnement d'un matériau extrait par tunnelier sont plus importants que ceux d'un matériau extrait traditionnellement. Cette différence n'est pas négligeable, et il est indispensable d'en tenir compte pour la gestion des transports, du stockage, de la mise en place et en décharge des matériaux excavés. Le tableau suivant donne des exemples de valeurs pour ce coefficient.

Mode d'excavation	Rapport volumique (coefficient de foisonnement)	
	matériau excavé / rocher	matériau compacté / rocher
Avancement mécanique	1.6 – 2.0	1.4 – 1.6
Avancement traditionnel	1.5 – 1.8	1.2 – 1.4

Figure 4-10 : Coefficient de foisonnement des matériaux d'excavation

4.5 Evaluation des matériaux excavés

4.5.1 Paramètres importants

Comme on l'a vu au § 4.2, la qualité des matériaux excavés est soumise à de fortes variations tout au long du creusement de l'ouvrage. Il est évident que la réutilisation de ces matériaux doit être évaluée dans un processus de sélection parallèlement à l'avancement. Les caractéristiques principales à déterminer pour cette sélection sont la pétrographie et la dureté. D'autre part, l'abrasivité du marin permet d'estimer l'usure des installations, et la teneur en matières polluantes peut déterminer la destination des matériaux.

4.5.2 Pétrographie

Il existe plusieurs "niveaux" de sélection sur la base de la pétrographie. Le choix de la précision de la caractérisation pétrographique dépend de la géologie et de l'utilisation prévue. Par exemple, dans un tunnel jurassien, dont les matériaux extraits ne seraient que des calcaires ou des marnes, destinés uniquement à la fabrication de matériaux de fondation, un examen visuel relativement sommaire permettant d'éviter qu'une trop grande proportion de marnes ne se retrouve dans les matériaux mis en place suffit. Par contre, un tunnel alpin avec une géologie relativement tourmentée et dont le marin pourrait servir d'agrégats à béton, nécessite une sélection pétrographique beaucoup plus poussée. L'avis d'un géologue pour une première sélection directement au front peut être indispensable, et on ne pourra se passer d'essais de laboratoire (examen au binoculaire, microscopie, chimie, etc.) pour s'assurer de la qualité finale des granulats produits.

4.5.3 Dureté, résistance

Les critères de dureté et de résistance ne sont utilisés que pour une utilisation sous forme de granulats à bétons de ciment ou bitumineux. La dureté de la roche peut être estimée au moyen de l'essai de charge ponctuelle, de l'essai Los Angeles ou de l'essai de broyabilité LCPC.

Des études ont montré que l'essai de broyabilité était le mieux adapté aux conditions de chantier, puisqu'il est le moins long des trois à réaliser, et qu'il nécessite le moins de quantité de matériau [THALMANN, 1996]. Il donne des résultats suffisamment exacts, et caractérise l'aptitude au broyage des matériaux excavés. Le test Los Angeles, outre le fait qu'il exige une longue procédure d'essai, ce qui ne favorise pas la rapidité d'intervention en cas de mauvais choix dans la sélection préliminaire au front, n'est pas très bien adapté pour des matériaux

extraits mécaniquement (influence de la forme des granulats). Si les valeurs données par l'essai de broyabilité sont limites, on peut de procéder à une confirmation à l'aide de l'essai de charge ponctuelle.

La classification des roches en fonction de leur coefficient de broyabilité BR, exprimé en %, est donnée à la Figure 4-11.

BR [%] :	0	25	50	75	100
Broyabilité :	Très faible	Faible	Moyenne	Haute	Très haute

Figure 4-11 : Classification des valeurs de mesures de l'essai de broyabilité

Le même appareil d'essai (abrasimètre) permet de calculer le coefficient d'abrasivité A_{BR} , qui caractérise l'usure des outils en contact avec la roche. On donne à la Figure 4-12 une classification des matériaux excavés en fonction de leur coefficient d'abrasivité. A la Figure 4-13 sont données quelques valeurs moyennes de ce coefficient pour quelques roches communes [BÜCHI, MATHIER, WYSS, 1995].

A_{BR} [g/t] :	0	500	1000	1500	2000
Abrasivité :	Très faible	Faible	Moyenne	Haute	Très haute

Figure 4-12 : Classification es valeurs de mesures de l'essai d'abrasivité LCPC

Roche	A_{BR} [g/t]
Quartzite	1 491
Granite aplitique	1 420
Amphibolite	1 374
Grès (métamorphique, quartzitique)	1 333
Granite	1 228
Gneiss oillé	1 201
Andésite	1 197
Gneiss schisteux	1 158
Grès quartzeux	1 060
Porphyre	894
Grès, moyennement dur	263
Calcaire sableux	236
Schiste argileux	125
Grès, tendre	106

Figure 4-13 : Valeurs moyennes du coefficient d'abrasivité A_{BR} LCPC pour quelques roches (résultats de 40 essais)

Bibliographie

THALMANN, C. (1995): Optimale Wiederverwertung von TBM-Ausbruchmaterial. - *Schweizer Ingenieur und Architekt*, 47, 1091-1096

THALMANN, C. (1996): *Beurteilung und Möglichkeiten der Wiederverwertung von Ausbruchmaterial aus dem maschinellen Tunnelvortrieb zu Betonzuschlagstoffen*. - Beiträge zur Geologie der Schweiz, Geotechnische Serie, 91

BÜCHI, E., MATHIER, J.-F., WYSS, CH. (1995): Gesteinsabrasivität - ein bedeutender Kostenfaktor beim mechanischen Abbau von Fest- und Lockergesteinen. Ein Vergleich zweier Prüfverfahren. - *Tunnel*, 5, 39-44

5. Traitements des matériaux excavés

5.1 Préambule

5.1.1 Utilisation de matériaux sans traitement préalable.

Les matériaux extraits à l'explosif ne peuvent être mis en œuvre sous leur forme brute, car la part de gros blocs est trop importante [THALMANN, 1996].

a) *Remblais*. Les matériaux de qualité médiocre excavés au TBM ou TSM peuvent généralement être utilisés comme tout-venant (remblais, remplissages, remblayages d'ouvrages, parois anti-bruit, etc.). Les exigences pour de telles utilisations sont les suivantes : faible compressibilité, compactabilité suffisante, bonne résistance au cisaillement, absence de composants gonflants à l'eau tels que gypse, anhydrite ou autres, absence d'éléments organiques inclus dans les parties fines, peu de schistes. L'utilisation de tels matériaux dans la construction de routes forestières non revêtues s'est avérée positive. Les roches marno-calcaires en particulier montrent un comportement fortement cohésif, qui limite l'émission de poussières. Dans des cas favorables, des matériaux non traités peuvent être utilisés comme grave II dans la construction routière.

b) *Agrégats à béton*. Dans le cadre des études préliminaires pour la construction des NLFA, des essais à grande échelle de fabrication de béton avec des agrégats extraits par tunnelier non traités ont été réalisés (OLBRECHT, STUDER, 1995). La mise en œuvre de tels bétons permettrait de limiter les déchets dus aux traitements sur les matériaux excavés. Le but de ces essais était de trouver des moyens liés à la technologie du béton pour atteindre les exigences définies pour le produit fini « béton ». On a ainsi pu montrer qu'il est techniquement possible d'obtenir un béton facilement ouvrable de la classe 30/20 selon la norme SIA 162 à partir de chips extraits par tunnelier non traités [VAN EGMOND, HERMANN, 1996].

La teneur en vide du matériau extrait au TBM avoisine les 40 %. Elle est donc sensiblement supérieure à celle d'un granulat roulé (25%). C'est pourquoi la quantité de ciment pour ce type d'agrégats doit être augmentée d'environ 5 à 10%. Cette augmentation de la quantité de béton entraîne un retrait plus important que pour un béton fabriqué avec des granulats roulés. La mise en œuvre de fluidifiants permet de maintenir le rapport des quantités d'eau et de ciment (E/C) dans des proportions acceptables.

La résistance au gel, en présence ou non de sels de déverglaçage, peut être qualifiée de plutôt faible à normale.

Le module d'élasticité E dépend du type d'agrégats utilisés. Des composants cristallins entraînent un module inférieur à celui obtenu avec des composants calcaires. Ces modules inférieurs ne sont pas forcément pénalisants dans la construction souterraine, puisque la ductilité ainsi améliorée limite les moments de flexion dans le béton [KÜNDIG ET AL, 1997].

5.1.2 Etudes géologiques préliminaires

La rentabilité de la transformation des matériaux excavés en matériaux de construction ne peut être estimée que si les parts des différentes qualités de matériaux peuvent être déterminées avec une précision suffisante [LARDELLI, RÜEGG, 1994]

Conformément à la norme SIA 199 "Etude du massif encaissant pour les ouvrages souterrains", l'appréciation des matériaux d'excavation devrait faire l'objet d'études déjà au stade de l'avant-projet. Cette appréciation géotechnique est à intégrer aux études géologiques.

Selon la norme SIA 199, l'aptitude à la réutilisation des matériaux d'excavation peut être classée de la manière suivante (art. 3 53) :

- Classe de matériau 1 : matériau utilisable comme matière première pour la production de ciment, concassé ou agrégats.
- Classe de matériau 2 : matériau utilisable pour les agrégats de béton ou pour les remblais à haute exigence (grave selon SN 670 120 "graves pour couches de fondation, exigences de qualité).
- Classe de matériau 3 : matériau utilisable pour les remblais sans exigence particulière, les remplissages ou les remblayages.
- Classe de matériau 4 : matériau non réutilisable.

5.2 Sélection des matériaux d'excavation réutilisables

Les traitements des matériaux, et en particulier les processus de sélection et d'essais doivent être optimisés afin de limiter leur influence sur l'avancement des travaux d'excavation. Une première sélection visuelle au front doit permettre de décider rapidement si le matériau peut être introduit dans le processus de valorisation ou s'il doit être mis en dépôt définitif. Une telle sélection peut être faite très précisément sur la base de données disponibles avant et pendant l'avancement. Parmi ces données figurent les prévisions géologiques, les valeurs d'expérience, la mise à jour des paramètres géophysiques pendant l'avancement, les paramètres de sondage et des tunneliers, les sondages préparatoires, les essais au scléromètre, etc. Une évaluation des qualités des matériaux est nécessaire en cas de changements des propriétés pétrographiques ou d'indices de modification de la lithologie.

Des essais en laboratoire contribueront dans une première étape à confirmer ou à corriger la décision prise lors de la sélection au front. Si cette dernière a conduit à une décision erronée, il faut compter que, selon le système de transport des matériaux, 50 à 100 m³ de matériaux sont déjà engagés dans le processus de traitements, et seront réutilisés. Comparé au débit journalier des installations qui peut atteindre 2 000 t (débit planifié dans le cadre des NLFA pour le projet du Gothard par exemple), les conséquences d'une mauvaise décision sur la qualité du produit fini sont négligeables [THALMANN, 1996]. Ceci montre néanmoins l'importance de la mise au point d'un processus de contrôle de la qualité des matériaux excavés rapide et efficace.

Dans le cadre des travaux pour Cleuson-Dixence, on a testé et évalué divers critères de sélection du marin :

- a) visuel : pétrographie, structure et forme des matériaux d'excavation
- b) « Los Angeles » : usure, friabilité
- c) « Point Load » : écrasement ponctuel
- d) LCPC-BR : broyabilité
- e) LCPC-ABR : abrasivité
- f) scléromètre : résistance
- g) carottage : résistance
- h) paramètres d'avancement du tunnelier : poussée, pénétration.

Dans les conditions de chantier, il s'est avéré que seuls les critères a) à e) pouvaient fournir des résultats représentatifs, suffisamment rapides et significatifs. Là encore, l'expérience a

montré que dans les conditions de chantier, seul un tri primaire des matériaux basé sur une décision rapide peut effectivement être réalisé sans risquer d'influencer l'avancement. Une classification plus fine en catégories n'est réalisable qu'ultérieurement, à la station de concassage par exemple [MICHEL ET AL, 1998].

5.3 Transports et dépôts

Le mode de transport des matériaux peut influencer le processus de traitement des matériaux. Par exemple, le diamètre maximal des matériaux transportés par bande ne peut généralement pas dépasser 200 mm. Selon le mode d'excavation, le marin peut contenir des granulats de dimension supérieure à cette limite. Dans ce cas, un concassage primaire peut s'avérer nécessaire, et conditionner les traitements ultérieurs des matériaux (choix du type de concasseur par exemple).

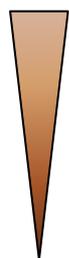
Pour limiter les émissions de poussière, les matériaux transportés par bandes sont aspergés d'eau. Par conséquent, même dans des massifs secs, les matériaux extraits mécaniquement ont une teneur en eau de 2 à 6%.

La teneur relativement élevée en particules fines associée à la teneur en eau ont pour conséquence que les matériaux déposés, que ce soit dans des engins de transport, sur des dépôts intermédiaires ou dans des silos, sont fortement agglutinés. C'est pourquoi le matériau extrait par TBM, même très rapidement après son dépôt, ne peut être repris que par des engins lourds. Le dépôt de matériaux fraisés dans des silos courants doit être exclu afin d'éviter des engorgements.

5.4 Concassage

5.4.1 Généralités

La fragmentation des corps solides couvre une gamme d'opérations dont les désignations ci-après sont généralement acceptées [BLANC, 1974].



Préconcassage : calibre des plus gros grains du produit fini ≥ 100 mm ;

Concassage : réduction jusqu'à des calibres maximaux de 25 à 100 mm;

Granulation : diamètres maximaux des produits finis de 6.3 à 25 mm ;

Broyage : réduction en gravier fin ou sable grossier, calibres max. de 0.5 à 6.3 mm ;

Mouture : réduction en grains fins.

Dans le cas des déblais de tunnels, on parlera plus particulièrement du préconcassage pour réduire les gros blocs à une taille permettant un transport aisé, et du concassage.

5.4.2 Types de concasseurs

Parmi les nombreux types de concasseurs disponibles sur le marché, on distingue deux familles principales d'engins, en fonction de leur mode d'action.

Les premiers opèrent par écrasement, soit entre deux mâchoires, l'une fixe et l'autre animée d'un mouvement d'oscillation autour d'un axe horizontal (concasseurs à mâchoires, Figure 5-1), soit entre une paroi conique fixe à axe vertical et un rouleau conique animé d'un mouvement excentrique à l'intérieur de l'espace limité par la paroi circulaire (concasseur à cône, Figure 5-2).

Le mode d'action principal des seconds repose sur la percussion, c'est-à-dire qu'au lieu d'y être soumise aux effets d'une pression lente, la matière reçoit ici des chocs violents qui provoquent sa fragmentation. La percussion peut être directe, c'est-à-dire que la matière à traiter étant supposée au repos ou se déplaçant à faible vitesse, est soumise à l'action d'outils de choc métalliques se déplaçant à grande vitesse (Figure 5-3). Elle peut également être indirecte, la matière étant alors projetée à très grande vitesse contre des plaques de choc formant enclumes fixes (Figure 5-4, à gauche). Dans le cas des concasseurs « autogènes », la matière est projetée sur elle-même (Figure 5-4, à droite).

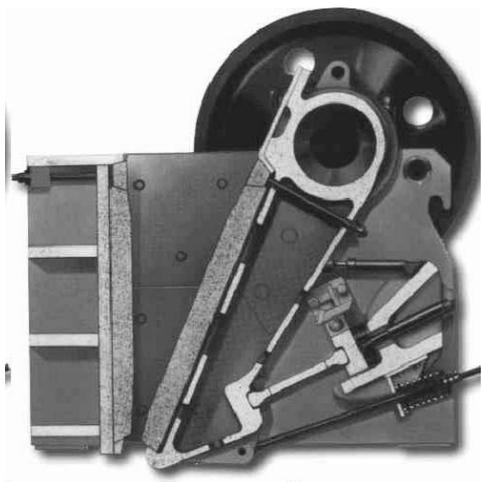


Figure 5-1 : Concasseur à mâchoires

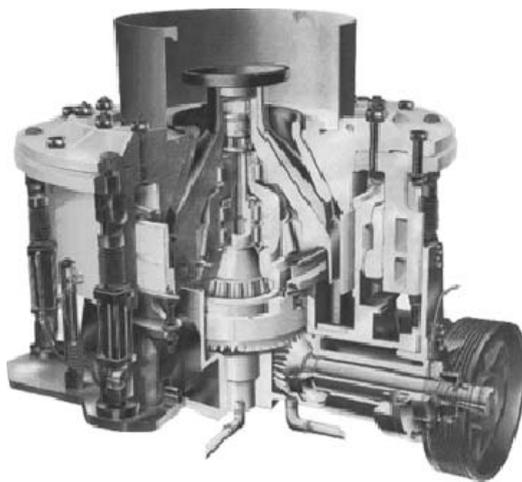


Figure 5-2 : Concasseur à cône

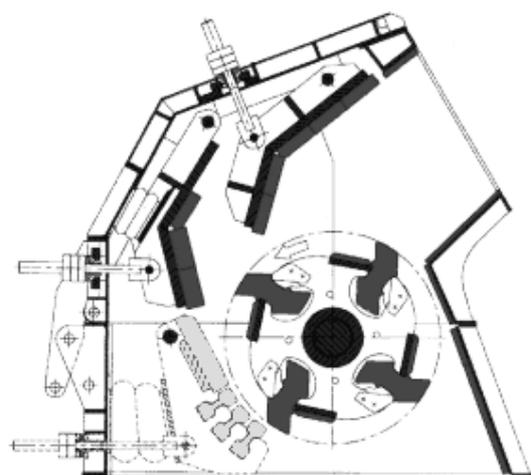
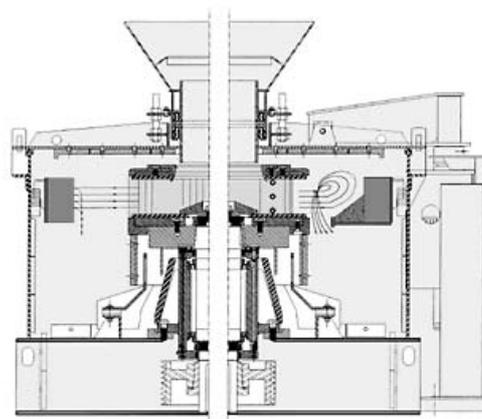


Figure 5-3 : Concasseur à percussion (axe horizontal)



Cross section of semi-autogenous and fully autogenous configurations.

Figure 5-4 : Concasseur à percussion vertical.

A gauche : projection matériau sur enclume.

A droite : projection matériau sur matériau (autogène).

Il existe d'autres types de concasseurs (à cylindres, à barres, à boulets, etc.), mais pour le traitement des matériaux d'excavation de tunnels, le choix du mode de concassage se fait généralement parmi les quatre types ci-dessus.

Les concasseurs à mâchoires ont un faible facteur de réduction (rapport du diamètre maximum du matériau à l'entrée du concasseur sur le diamètre maximum du matériau à la sortie), qui s'élève au maximum à 7. La part de grains fins ainsi produite est très réduite, et en fonction de la granulométrie du matériau brut, elle peut ne pas suffire pour un produit fini compactable. Les concasseurs à marteaux ont quant à eux un très haut facteur de réduction, qui peut atteindre 50 en fonction des caractéristiques de l'engin. La partie fine est représentée

en plus grande quantité que pour les concasseurs à mâchoires (voir synthèse à la Figure 5-5, [BREITENBÜCHER ET AL, 1996]).

Type de concasseur	Avantages	Inconvénients	Domaines d'utilisation
A mâchoires	<ul style="list-style-type: none"> - Construction simple et robuste - Usure réduite - Concasse les roches les plus dures 	<ul style="list-style-type: none"> - Mauvais facteur de réduction - Mauvaise forme des granulats concassés (plats) 	Adapté au concassage de gravats ne présentant pas de problèmes particuliers, en cas d'exigences réduites concernant le débit et la qualité du produit fini
A marteaux	<ul style="list-style-type: none"> - Bon facteur de réduction - Utilisable pour toutes sortes de gravats - Forme des granulats produits favorable, cubique 	<ul style="list-style-type: none"> - Usure relativement importante - Peu produire, selon les conditions, trop de grains fins 	Adapté pour le recyclage de toutes sortes de matériaux, débit important. Le choix d'un concasseur avec des paramètres appropriés conduit à un très bon produit fini, tant en ce qui concerne la forme des grains que la répartition granulométrique
Combinaison mâchoires + marteaux	<ul style="list-style-type: none"> - Réunit les avantages des deux types de concasseurs - Grande capacité si l'installation est correctement dimensionnée 	<ul style="list-style-type: none"> - Investissement important 	Combinaison idéale en cas de besoin de grandes capacités de traitement en de hautes exigences sur le produit fini
Combinaison mâchoires + boulets	<ul style="list-style-type: none"> - Très bonne qualité du produit fini : granulats très anguleux et cubiques - Usure réduite 	<ul style="list-style-type: none"> - Investissement important - Pas adapté à tous les matériaux 	Particulièrement conseillé si les granulats doivent répondre à des exigences très élevées. Nécessite cependant un conditionnement important des matériaux d'apport..

Figure 5-5 : Critères de choix pour le concassage (adapté de [BREITENBÜCHER ET AL, 1996])

5.4.3 Choix des installations

Le choix et la mise au point du concasseur principal dépend des propriétés de la roche excavée ainsi que des exigences édictées pour le produit fini. Le concassage des matériaux extraits mécaniquement doit être moins intensif que pour des matériaux extraits à l'explosif, car le diamètre minimal (G) déjà à priori trop faible du matériau brut ne doit pas être encore trop réduit. Le concassage en concasseurs à percussion est plus délicat et conduit à une meilleure cubicité des grains que le concassage avec des concasseurs à mâchoires ou à cônes. Des procédés adéquats pour la production de gravillons sont par exemple les concasseurs verticaux, qui produisent un gravier comportant des grains plus cubiques aux arêtes moins vives. Le matériau concassé peut ensuite être introduit dans un processus artificiel d'arrondissement des arêtes au moyen de tambours à friction; le matériau ainsi obtenu approche la forme naturelle des graviers alluvionnaires. La rentabilité de tels tambours et du processus d'arrondissement des arêtes est largement controversé dans les milieux spécialisés, sa mise en œuvre produisant 5 à 10% de déchets. De plus, ces matériaux présentent un risque

accru d'orniérage et ne peuvent pas être utilisés pour l'élaboration de bétons bitumineux sans essais complémentaires.

	Fraction 4/8 mm	Fraction 8/16 mm	Fraction 16/32 mm
Chips de tunnelier non concassés	63 – 70 %	72 – 85 %	79 – 96 %
Chips de tunnelier concassés	26 – 75 %	26 - 63 %	31 – 75 %

Figure 5-6 : teneur en composants non cubiques (définition selon la norme VSS/SN 670 710 d), tiré de KRUSE, WEBER, 1995

Comme indiqué au paragraphe 4.1.2, les fractions inférieures à 8 mm présentent une cubicité relativement bonne, et ne doivent pas être concassés. En outre, une large part des grains très longs reste sur les tamis et est introduite dans le processus de concassage. Les fractions tamisées à 0/4 et 4/8 mm peuvent par conséquent être mélangées avec les mêmes fractions résultant du concassage.

Comparativement à une installation « standard » de production de gravier concassé, une installation adaptée au traitement de matériaux extraits par tunnelier présente les particularités suivantes [THALMANN, 1996] : introduction continue de la matière première dans le cycle de traitements ; grande capacité de lavage ; types de concasseurs adaptés ; possibilité de choisir le diamètre minimal des grains introduits dans le processus de concassage (4, 8 ou 16 mm par exemple) ; installations de séparation des sables et de traitement des boues performantes.

Bilan de production d'essais de traitements avec du matériau extrait par tunnelier

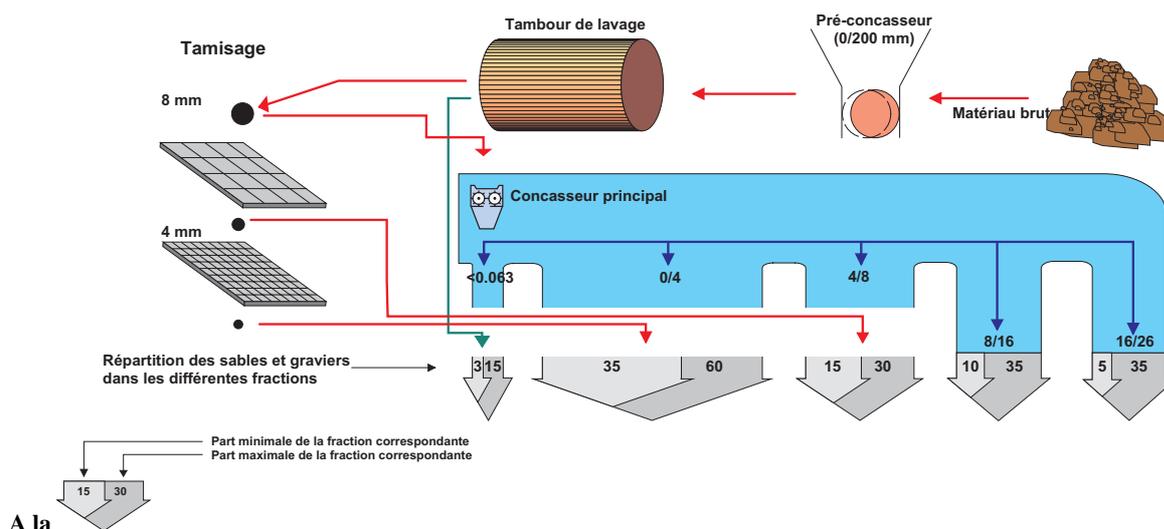


Figure 5-7 sont résumés les bilans de productions d'essais de préparation de granulats à béton exécutés en Suisse sur des installations standard. Les différents essais de concassage ont tous donné des résultats positifs et prouvent qu'avec du matériau extrait au tunnelier, on peut

produire une quantité suffisante de gravier 16/32 mm. Un diamètre maximal compris entre 25 et 28 mm – comme on le fait souvent dans la pratique pour des granulats concassés – permet d’augmenter la proportion des diamètres les plus grands et d’améliorer l’ouvrabilité du béton frais.

Bilan de production d'essais de traitements avec du matériau extrait par tunnelier

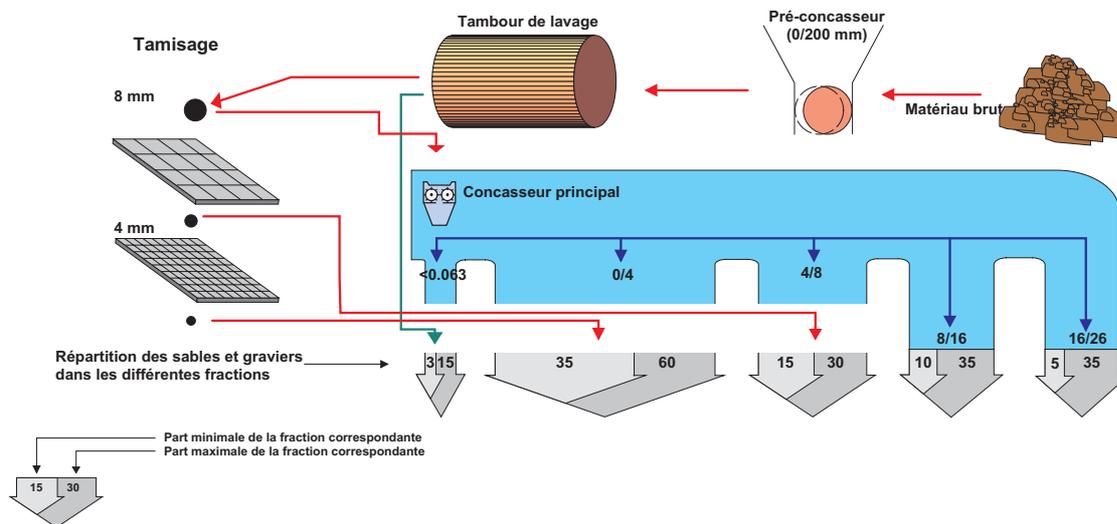


Figure 5-7 : bilan de production d'essais de fabrication d'agrégats à béton avec du matériau extrait par tunnelier (adapté de Kündig et al., 1997).

Lors de la mise en œuvre de béton composé de granulats concassés, on doit s’accommoder des inconvénients certains concernant l’ouvrabilité et les propriétés du béton (Figure 5-8).

Propriétés du béton	Granulats concassés par opposition à roulés
Quantité de ciment	5 – 20% plus importante
Adjuvants	Equivalent
Ouvrabilité	Moindre
Résistance	Meilleure
Module E	Plus bas
Etanchéité	Equivalent
Gel/dégel, et résistance aux sels de déverglaçage	Equivalent
Retrait	Plus grand
Comportement à long terme	?

Figure 5-8 : Comparaison des propriétés de bétons fabriqués avec des granulats concassés et avec des granulats roulés (selon Thalmann, 1996)

5.5 Criblage et lavage

Il existe deux grandes familles de cribles sur le marché, soit les cribles statiques et les cribles vibrants. L'utilisation de cribles statiques pose des problèmes fréquents d'obstruction des ouvertures, et n'est justifié que dans des cas de faibles refus, ce qui permet des débits de passants élevés [DELILLE & MOUTOT, 1990]. Les cribles vibrants peuvent être inclinés, ce qui favorise l'avancement grâce à la composante horizontale de l'action de vibration.

La séparation des parties les plus fines dans le cas des matériaux extraits par tunneliers, décrite au § 5.4.3, est décisive pour assurer une utilisation optimale. Les critères de décision pour le dimensionnement de cette séparation primaire sont les suivants [RÖTHLISBERGER, FROMM, 1998] :

- Granulométrie désirée pour les produits finis
- Régularité des courbes granulométriques en cas de changements de la granulométrie
- Gestion des déchets, influencée par la différence de granulométrie de ces derniers.

Pour obtenir des matériaux lavés ou pour permettre le criblage sous eau, meilleure façon d'éviter le colmatage des garnitures de criblage dans le cas de coupures fines, les cribles doivent pouvoir être équipés de dispositifs d'arrosage. En outre, dans le cas de l'avancement mécanique, si le matériau brut est criblé, le marin pourra être lavé avant cette opération au moyen de tambours de lavage, afin de ne pas engorger les tamis. En effet, suite à l'arrosage du matériau sur les bandes transporteuses des tunneliers pour limiter le dégagement de poussière, les fractions les plus fines adhèrent en partie aux composants plus gros. Ainsi, en fonction de la pétrographie, de la teneur en eau et du temps de dépôt, il peut se former une croûte plus ou moins cimentée, qu'il est nécessaire d'éliminer.

Une attention toute particulière doit être portée à la classification des sables, afin qu'une courbe granulométrique optimale soit atteinte. Les matériaux d'excavation comprennent en effet des matériaux de granularité étendue et variable au fil de l'avancement, entraînant la nécessité d'utiliser des équipements appropriés pour fournir des sables de très grande propreté et de composition granulaire rigoureuse et constante. Pour effectuer les séparations des classes granulaires intermédiaires dans les sables, on dispose de plusieurs types de "classificateurs" travaillant suivant des principes différents. On donne à la Figure 5-9 différents types d'appareils de classification avec leurs caractéristiques principales [ARCHIMBAUD et al, 1990].

Appareils	Principe de classification	Gamme d'utilisation pour la classification des sables [mm]					Cons. en eau [m ³ /t]	Imperfection [mm]
		5-1.6	1.6-0.4	0.4-0.08	0.08-0.04	0.04-0.02		
Crible	Tamissage vibrant avec arrosage et sous eau	> 1.6					1 à 2	0.15 à 0.3
Grilles courbes	Tamissage statique sur toiles et grilles inclinées		1.6 à 0.1				2 à 4	0.15 à 0.25
Panneau tamiseur	Tamissage statique		1.6 à 0.1				1 à 1.5	0.1 à 0.2
Caisse à pointe	Courant de surface Décantation			0.4 à 0.08			1 à 8	0.4 à 0.7
Vis (spirale)	Courant de surface Décantation Extraction mécanique			0.4 à 0.08			1 à 5	0.4 à 0.5
Hydrosizer-Rheax-Floattex	Courant ascendant		1.6 à 0.08				3 à 5	0.15 à 0.2
Lavodune-Lavoflux	Courant ascendant Courant en conduite inclinée		1.6 à 0.04				3 à 5	0.1 à 0.2
Hydrocyclones	Courant centrifuge	En séparateur- épaississeur 5 à 0.150		En classification 0.150 à 0.020			3 à 10	0.3

Figure 5-9 : Appareils de classification des sables

5.6 Traitement des boues et déchets

Les boues de lavage sont un sous-produit de l'industrie des graviers et représente en Suisse avec 1.5 à 2.0 Mio. t/an (substance sèche) un volume de déchet considérable, avec ses propres problèmes d'élimination. Elles sont produites lors des processus industriels de lavage et de transformation de gravier et constitue la part essentielle des parties fines (diamètre < 0.063 mm) contenues dans les formations géologiques exploitées. Dans les carrières, selon la teneur en argile du gravier extrait, la quantité de boues produite peut fortement varier, de 2 à 5% pour du gravier propre, jusqu'à 30 à 40% pour des graviers fortement argileux ou des moraines graveleuses. L'amointrissement des ressources a pour conséquence que de plus en plus de graviers à forte teneur en argile sont exploités. Il faut donc s'attendre dans les années futures à un accroissement de la production de boues de lavage. Dans les tunnels, les fines représentent généralement près de 15% de la quantité totale de matériau excavé.

Les installations de traitement modernes permettent de plus en plus d'assécher les boues produites. Ainsi les volumes de déchets peuvent être fortement diminués et l'eau de lavage épurée peut être réinjectée dans le processus de transformation. Pour la déshydratation, on utilise des installations de sédimentation avec floculation. Après ce traitement, la teneur en matière solide de la boue sédimentée se monte à environ 500 g/l, ce qui correspond à une extraction d'eau d'environ 90%. De plus en plus souvent, on met en œuvre une deuxième étape de déshydratation au moyen de presses filtrantes ou de centrifugeuses, qui réduisent le solde de liquide contenu dans les boues jusqu'à 23 à 28% du poids. Ainsi les boues sont rendues solides, et leur élimination simplifiée. Ces installations doivent non seulement être performantes, mais elles devraient permettre de réinjecter des fines (selon leurs propriétés pétrographiques) comme filler dans le sable, afin de limiter les quantités de déchets. Si la fraction fine est inappropriée pétrographiquement – par exemple si elle contient trop de micas – elle devra être remplacée par un succédané approprié.

Les possibilités d'utilisation des boues sont énumérées à la Figure 5-10. Beaucoup sont encore à l'étude. On a cependant de bonnes raisons de croire que plusieurs d'entre elles seront réalisées dans les années qui viennent. Un exemple d'utilisation réussie est l'introduction de boues de lavage comme matière première pour l'industrie Suisse de fabrication de briques. Des études menées dans le cadre des essais préliminaires pour la gestion des matériaux excavés lors de la construction des NLFA ont en effet montré que le remplacement des sables traditionnellement utilisés comme élément d'amaigrissement de la terre cuite donne des

résultats satisfaisants pour la fabrication de briques de maçonnerie. Les essais sont moins convaincants pour la fabrication de tuiles [Rickli et al, 1998].

Pour que les matériaux ainsi valorisés gardent leurs propriétés, les opérations de transport et de dépôts intermédiaires doivent cependant être adaptées. Les parties fines des matériaux excavés de tunnels perdent leur valeur en particulier :

- par la présence de gypse ou de composants carbonatés, surtout si ceux-ci sont plus grands que 500 μm
- en cas de mélange avec des eaux de chantier de composition non connue (une gestion séparée des boues de drainage de tunnel et des boues de lavage est donc conseillée)
- en cas de pollution avec du gravier, du sable contenant des carbonates ou des matériaux similaires lors des opérations de manutention sur les places de dépôts.

En outre, diverses applications géotechniques dans les domaines de la réhabilitation des produits toxiques, de la protection des eaux souterraines, de la régulation des nappes phréatiques et de la géothermie semblent prometteuses. Les particules fines extraites lors du séchage des boues pourront également être mêlées à des matériaux plus grossiers pour la confection de remblais ou une utilisation en sols stabilisés par exemple.

Etat des déchets	Possibilités de valorisation	Remarques
Liquide (boues de lavage non traitées)	- minéralisation de sols, en particulier de sols forestiers	Coûts de transport importants.
Visqueux (boues après floculation)	- additif minéral à des sols fortement organiques ou à des déchets organiques (boues d'épuration) - matériau d'étanchéité pour décharges d'ordures (avec ou sans bentonite) - barrière géotechnique (régulation de nappes phréatiques, géothermie, décharges, déchets toxiques)	Dosage limité, difficultés de mélange. Adsorption de métaux lourds par les minéraux argileux. Teneur en eau encore élevée, peu stable.
Solide (boues après floculation et une deuxième étape de déshydratation)	- matériau d'étanchéité pour décharges d'ordures - matière première pour la fabrication de produits en céramique grossière - matériaux de fondation de route après stabilisation avec CaO ou ciment - matière première pour la construction en pisé	Probabilité de mise en œuvre en Suisse pratiquement nulle.
Granulés, séchés	- substrat ou matériau de remplissage pour des produits chimiques - produit d'adsorption ou de neutralisation pour des installations filtrantes	
Activés (chauffage rapide jusqu'à env. 900°C)	- moulu, produit de stabilisation pour l'infrastructure routière (équivalent à du CaO ou du ciment) - réduit en granulats ou en poudre, produit d'adsorption ou de neutralisation dans des installations filtrantes - moulu, liant hydraulique	
Séchés, moulus	- matière première pour la fabrication de ciment - matière première pour la céramique fine - matière première pour des matériaux de construction légers	
Séchés, en morceaux	- matière première pour fibres minérales	

Figure 5-10 : Possibilités d'utilisation des boues de lavage (adapté de Kündig et al., 1997)

5.7 Exemples d'installations de traitements

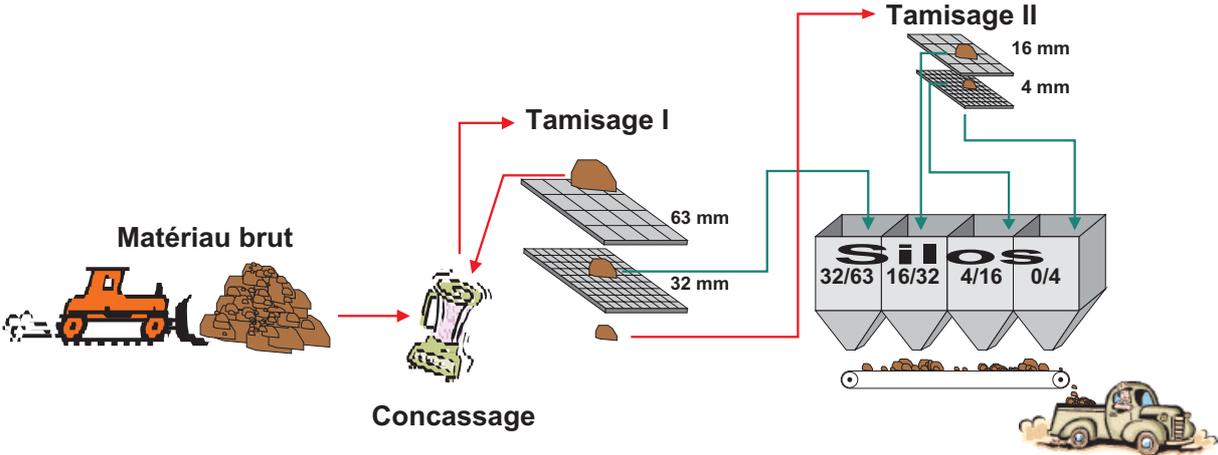
5.7.1 Tunnels de la traversée de Sierre (A9)

Lors de la construction des tunnels de Plantzette et de Géronde sur l'autoroute A9 à Sierre, les matériaux excavés (terrain meuble, calcaires) ont été concassés pour en faire des graves réutilisées directement dans les ouvrages comme couche de fondation, ainsi que sur les tronçons extérieurs de l'autoroute.

Ces installations ne permettant pas le lavage des matériaux, les graves fabriquées contenaient une partie de fines légèrement supérieure que pour une grave I normalisée. Le matériau produit a cependant été utilisé comme une telle grave avec succès.

Sur les 273 000 m³ de matériaux traités ici, 37 000 m³ de la fraction 0/4 n'ont pas pu être réutilisés (surproduction de fines). Ceci représente une part de rejet d'environ 13.7%. Ces matériaux sont cependant utilisables dans la construction, pour des enrobages de conduites par exemple. Ils ne sont pas mis en dépôts définitifs, mais restent à disposition des entreprises locales.

Figure 5-11 : Schéma de fonctionnement des installations de recyclage. Tunnels A9, traversée de Sierre (VS)



5.7.2 Tunnels de la N8 entre Interlaken et Brienzwiller

L'office des routes nationales du canton de Berne a fait œuvre de pionnier en Suisse dans le domaine de l'utilisation des matériaux d'excavation de tunnels. Dès 1975 en effet, les matériaux extraits des tunnels entre Interlaken et Brienzwiler ont fait l'objet d'une valorisation [KUNZ ET AL, 1983 ; JENK ET AL, 1987].

De 1975 à 1976, ce sont les matériaux du tunnel du Ruggen qui ont été transformés en grave de fondation 0/100, en grave routière 0/63, ainsi qu'en matériau 30/63 pour des pénétrations.

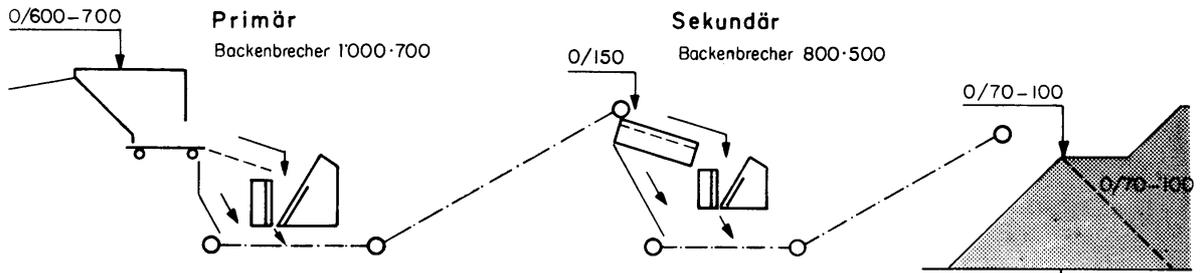
De 1977 à 1980, la roche excavée au tunnel de Giessbach a servi à la fabrication de matériaux 0/100. En outre, ces matériaux ont été partiellement mêlés à des agrégats à béton roulés, le béton fabriqué étant utilisé dans les revêtements du tunnel.

Dès 1981, les matériaux des tunnels de Chüebalm et de Sengg ont également servi à la fabrication de matériaux de fondation 0/70, de grave 0/30 et de grave pour pénétrations 30/50. En outre, depuis 1981, la totalité du béton pour les ouvrages d'art (murs de soutènement, ponts, passages inférieurs, etc.), les tunnels ainsi que pour les revêtements en béton de ciment de la chaussée entre Bönigen et Giessbach a été fabriqué avec 100% de granulats concassés extraits des tunnels.

Le schéma de production des installations de traitement des matériaux des tunnels de Chüebalm et de Sengg sont représenté à la Figure 5-12.

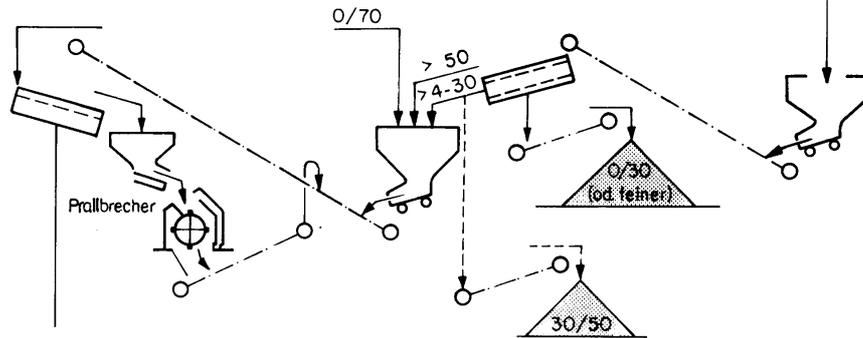
Vorbrecheranlage (2 - Stufig)

60-90m³/h



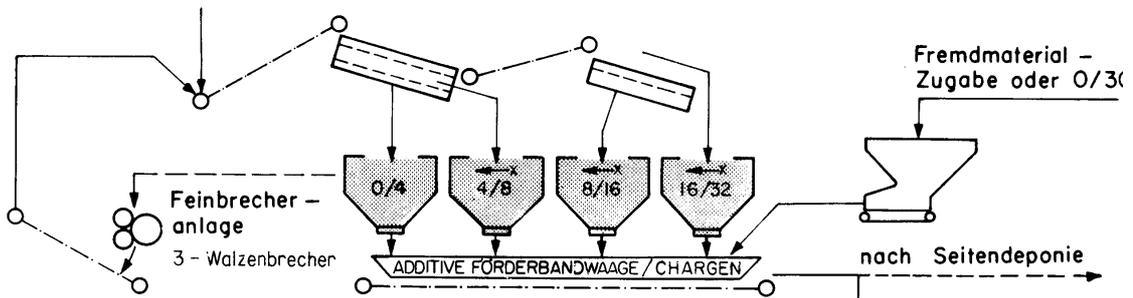
Zwischensortier- und Nachbrecheranlage

30-40m³/h



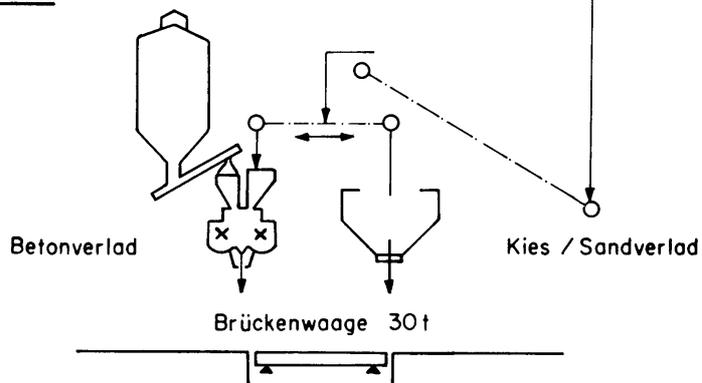
Sortier- und Dosieranlage

25-35m³/h



Betonzentrale und Verlad

40-48m³/h



(AGGREGAT AG, ALTDORF)

Figure 5-12 : Schéma de fonctionnement des installations de fabrication de granulats à béton. Tunnels de la N8 entre Interlaken et Brienzwiler [KUNZ ET AL, 1983]

Bibliographie

- ARCHIMBAUD, C., BERTHAIL, J., EXBRAYAT, J.-C., MISHELLANY, A. (1990) : Lavage des granulats et traitement des sables – *Les granulats* (Chap. 12) – Presses de l'école nationale des ponts et chaussées
- BLANC, E.C. (1974) : *Technologie des appareils de fragmentation et de classement dimensionnel* (tomes 1, 2, 3) – Eyrolles
- BREITENBÜCHER, R., BUDNIK, J., EIBL, J., GRÜBL, P., KOHLER, G., KURKOWSKI, H., HORA, M., PENZEL, U., RAHLWES, K., WALTHER, H.-J. (1996) : *Umweltgerechter Rückbau und Wiederverwertung mineralischer Baustoffe* – Beuth Verlag GmbH
- DELILLE, J.-P., MOUTOT, J.-P. (1990) : Le Criblage - *Les Granulats* (Chap. 10) – Presses de l'école nationale des ponts et chaussées
- JENK, K., BUCHER, M., COLOMBI, C. (1987) : Die Nationalstrasse N8 von Interlaken bis Brienzwiler – *Strasse und Verkehr*, 6, 371-382
- KRUSE, M., WEBER, R. (1995): Beton aus TBM-Ausbruchmaterial. - *Schweizer Ingenieur und Architekt*, 47, 1082-1086
- KÜNDIG, R et al. (1997): *Die Mineralischen Rohstoffe der Schweiz* - Schweizerische Geotechnische Kommission
- KUNZ, U., GIUDICETTI, F., JENK, K. (1983): Foundationsschichten, Bauwerks- und Belagsbeton mit 100% gebrochenem Gestein. - *Schweizer Ingenieur und Architekt*, 46, 1081-1091
- LARDELLI, T., RÜEGG, TH. (1994) : Die Geologie der Tunnel Crapteig und Sils – *Strassen und Verkehr*, 5, 218-223
- MICHEL, P., JAQUEMOUD, J., PRALONG, J., CARRON, C. (1998): Cleuson-Dixence : réutilisation des matériaux d'excavation. - *Ingénieurs et architectes suisses*, 17/18, 266-270
- OLBRECHT, H. P., STUDER, W. (1995): Beton aus TBM-Chips. - *Schweizer Ingenieur und Architekt*, 47, 1087-1090
- RICKLI, M., EGGENBERGER, U., PETERS, T., MEYER, CH., MUMENTHALER, TH. (1998) : Feinstanteil von Tunnelausbruchmaterial als sekundärer Rohstoff in grobkeramischen Produkten. – *ZI Ziegelindustrie International*, 12/98, 818-827
- RÖTHLISBERGER, B., Fromm, J. (1998): Tunnelausbruch Vereina und Gotschna. - *Publication de la Société Suisse de Mécanique des Sols et des Roches*, 136, 12-16

THALMANN, C. (1996): *Beurteilung und Möglichkeiten der Wiederverwertung von Ausbruchmaterial aus dem maschinellen Tunnelvortrieb zu Betonzuschlagstoffen*. - Beiträge zur Geologie der Schweiz, Geotechnische Serie, 91

VAN EGMOND, B., HERMANN, K. (1996): Granulats composés de matériaux extraits par tunnelier. - *Bulletin du ciment*, 9, 35-43

6. Exigences pour l'utilisation

6.1 Généralités

Les matériaux d'excavation de tunnel ont été par le passé très fréquemment utilisés pour remanier la topographie d'un lieu et plus particulièrement par la mise en décharge afin de combler une cuvette du terrain naturel. Ainsi le maître d'ouvrage savait où déposer ce volume parfois considérable de matériaux, et l'agriculteur gagnait une nouvelle surface de terres cultivables. Aujourd'hui ces remaniements de terre sont en contradiction avec la réglementation environnementale (eaux souterraines, paysage, transport, etc) et il est nécessaire de proposer de nouvelles solutions pour les matériaux d'excavation de tunnel.

La valorisation des matériaux de récupération de tunnel consiste à "anoblir" les déchets obtenus lors de l'excavation des tunnels par divers traitements (voir chapitre 5) pour les transformer en de nouveaux matériaux de construction ou en des produits semi-finis. Ces matériaux peuvent alors être utilisés dans divers domaines dont celui particulièrement favorable de la construction routière.

Cependant, pour que ces nouveaux matériaux soient utilisables de manière adéquate, ils doivent répondre, en fonction de leur utilisation, à des exigences bien précises. Celles-ci reposent d'une part sur des critères relatifs à la composition du matériau, et d'autre part sur des critères relatifs au comportement à long terme des matériaux. Les principaux critères et les essais permettant de les quantifier sont résumés à la Figure 6-1. Ce tableau vide n'est qu'un canevas et devrait être complété et remplis dans le cadre d'une recherche plus approfondie que la présente étude.

La présentation des exigences pour l'utilisation des matériaux de récupération de tunnel est réalisée en deux parties. Dans un premier temps sont donnés au chapitre 6.2 les diverses caractéristiques et les essais associés permettant d'évaluer les granulats (chap. 6.2.1), les sols (chap. 6.2.2) et les enrobés (chap. 6.2.3). Dans un deuxième temps sont donnés au chapitre 6.3 les exigences requises pour diverses utilisations de ces matériaux.

		Caractéristique												
		<i>Pétrographie</i>	<i>Teneur en particules polluantes</i>	<i>Granulométrie</i>	<i>Dimension du plus gros grain</i>	<i>Propreté</i>	<i>Forme - Cubicité</i>	<i>Angularité - Arrondi</i>	<i>Dureté - Abrasivité</i>	<i>Polissage</i>	<i>Perméabilité</i>	<i>Capacité portante</i>	<i>Susceptibilité au gel</i>	<i>Compactabilité</i>
Utilisation	<i>Vrac</i>	Mise en décharge												
		Filtres pour drainage												
	<i>Remblais non sollicités</i>	Remodelage du paysage												
		Murs de soutènements												
		Digues antibruit												
		Tranchées couvertes												
	<i>Remblais sollicités</i>	Routiers												
		Ferroviaires												
	<i>Fondation routière</i>	Grave												
		HMF												
	<i>Fondation ferroviaire</i>	Grave PSS												
	<i>Revêtement routier</i>	Couche de support HMT												
		Couche de surface	AB											
			DRA											
			SMA											
	MR													
<i>Granulat à béton</i>														
		<i>Analyse pétrographique</i>	<i>Analyse chimique</i>	<i>Tamisage</i>	<i>Mesure du diamètre</i>	<i>Examen visuel, limite de liquidité</i>	<i>Essai de cubicité</i>	<i>Essai d'écoulement</i>	<i>Los Angeles, Deval, micro-Deval</i>	<i>CPA</i>	<i>Essai de perméabilité</i>	<i>CBR, ME, pénétromètre dynamique</i>	<i>Gonflement au gel, CBRF,</i>	<i>Proctor, AASTHO</i>
Type d'essai														

Figure 6-1 : Caractéristiques déterminantes en fonction de l'utilisation des matériaux

6.2 Caractéristiques et essais

Les définitions des caractéristiques et des essais y relatifs sont présentées tout d'abord en ce qui concerne le granulat, puis le sol et enfin l'enrobé.

6.2.1 Caractéristiques des granulats et essais permettant de les déterminer

Lorsque l'on parle d'exigences relatives à un sol, il faut d'abord s'intéresser aux caractéristiques des granulats. Les principales caractéristiques auxquelles les matériaux pierreux doivent répondre pour une utilisation dans le domaine routier sont :

- La pétrographie
- La granulométrie
- La forme
- La propreté
- L'angularité
- La dureté

PETROGRAPHIE

La pétrographie permet de déterminer la composition d'une roche. La qualité maximale des matériaux impropres du point de vue pétrographique est limitée en fonction de l'utilisation prévue des granulats. Ces matériaux impropres sont essentiellement les paillettes de mica, les schistes à mica friables et à chlorites, les schistes talqueux et argileux, les calcites à gros cristaux, les grès molassiques, etc. L'analyse pétrographique est réalisée par examen visuel et à l'aide d'essais chimiques .

GRANULOMETRIE

La granulométrie est le résultat de *l'analyse granulométrique* réalisée par tamisage à l'aide de tamis à mailles carrées calibrées. Son but principal est de déterminer pour un sol, sa teneur en éléments fins, le calibre des plus gros éléments ainsi que le pourcentage de chacune des classes granulaires constituantes.

La forme de la courbe granulométrique, (de type continue, discontinue, étalée, serrée comme montré à la Figure 6-2) conditionne l'aptitude au compactage, l'absence de ségrégation ainsi que la compacité du matériau après compactage. Une granulométrie continue et étalée

caractérise généralement un sol ayant une bonne capacité à être compacté, au contraire d'une granulométrie serrée qui implique une forte proportion de vides dans le sol.

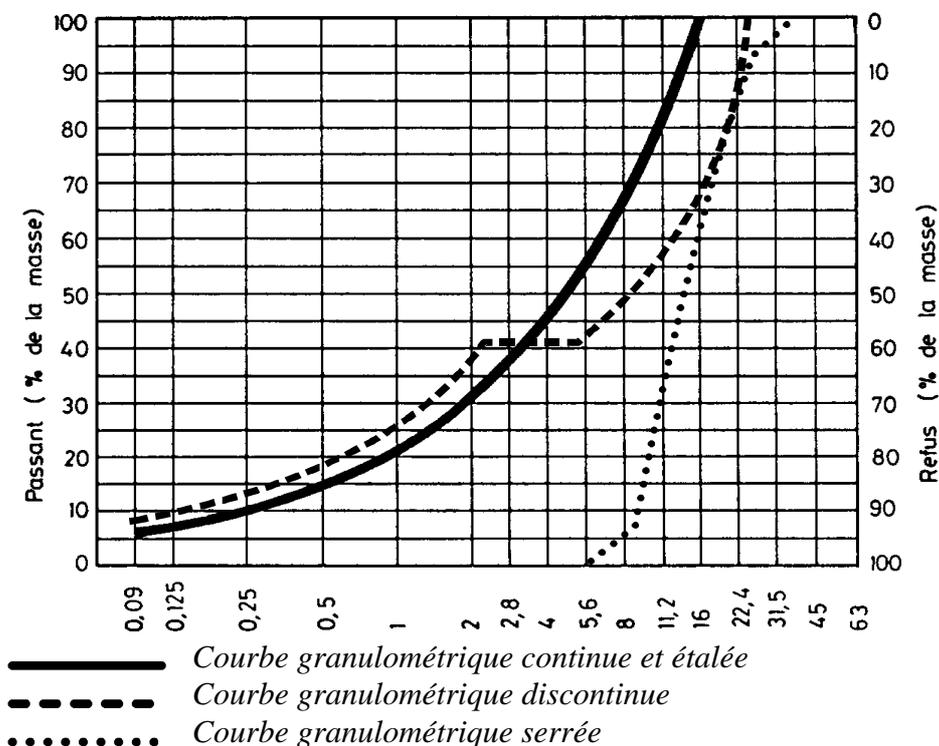


Figure 6-2 : Types de granulométrie

La norme SN 670 810 [1] présente les prescriptions d'essai pour la détermination de la courbe granulométrique.

FORME - CUBICITE

La forme ou cubicité des granulats est caractérisée par trois grandeurs : la longueur L , l'épaisseur E et la grosseur G . Par principe les dimensions sont définies de sorte que $L > E > G$. Les divers rapports entre ces grandeurs permettent de déterminer la forme de l'échantillon (cf. Figure 4-4).

Pour déterminer de manière rapide la forme d'un granulat (cubique - non cubique) on procède à *l'essai de cubicité*. Cet essai se réalise en tamisant un échantillon. Les granulats retenus sur un tamis à maille carrée d'ouverture D (mm) sont tamisés à nouveau sur une grille à fentes d'écartement $D/1.58$ (mm). On considère que les granulats retenus sur la grille sont cubiques (sphériques). L'échantillon est dit cubique si au moins 80 % de la masse est constituée de granulats cubiques (sphériques).

Il est également possible d'évaluer la cubicité en mesurant un échantillon représentatif (>200 granulats) au pied à coulisse. On considère alors que les grains sont cubiques si le rapport $E/L \leq 0.4$.

ANGULARITE

L'angularité ou état des arêtes est une caractéristique permettant de déterminer la capacité des granulats à s'imbriquer entre eux. L'angularité est fonction de la forme des arêtes du granulat. Cette propriété est vérifiée par *l'essai d'écoulement*.

L'essai d'écoulement consiste à déterminer le temps d'écoulement sous l'effet de la gravité, d'une quantité fixe de granulat à travers un orifice donné. Plus le temps d'écoulement est long, plus l'angularité du matériau est élevée. Les matériaux roulés (forme ronde) présentent une angularité inférieure aux matériaux concassés.

PROPRETE

Le matériau est considéré propre s'il ne contient pas d'éléments fins ou organiques indésirables. La propreté des granulats est déterminée par le pourcentage de fines contenu dans et sur les granulats. Les impuretés telles que les matériaux argileux, les matières organiques (bois, humus) sont également à éliminer car elles entravent l'enrobage des granulats ou augmentent sa sensibilité au gel.

Pour déterminer la propreté d'un granulat, en particulier en vue de son utilisation pour un béton, on procède à un *essai de sédimentation*. Pour le réaliser, on introduit les granulats séchés dans un cylindre gradué avec 0.5 l d'eau. Après avoir agité de manière intensive le cylindre gradué, on le laisse reposer pendant une heure. La fraction fine forme alors une couche de floculat au-dessus des granulats qui ont sédimenté. Les particules en suspension (argile) rendent l'eau trouble. Les fragments de bois, l'humus, ... restent à la surface. La propreté des granulats se mesure alors par la fraction de matières nuisibles (bois, argile, fraction fine).

DURETE

Les matériaux pierreux destinés à la fabrication des bétons bitumineux doivent pouvoir résister à la fragmentation par chocs ainsi qu'à l'abrasion. Ces caractéristiques sont déterminées à l'aide de *l'essai Los Angeles*, de *l'essai Deval* ou *micro-Deval*.

L'essai Los Angeles, mesurant la fragmentation des granulats, consiste à placer un échantillon de gravillon dans un cylindre métallique tournant, avec des boulets en fonte. On mesure alors la poussière produite (éléments passant au tamis de 2 mm) au cours de l'essai.

L'échantillon à essayer et la charge abrasive (boulet en fonte) sont placés dans la machine "Los Angeles"; la machine tourne alors pendant 500 révolutions à la vitesse de 30 à 33 tours par minute. A la fin de l'essai, le matériau subit un tamisage à 2 mm. Le refus au tamis 2 mm est alors lavée, puis séchée et enfin pesée. On calcule finalement la perte de poids relative de l'échantillon, soit la différence entre le poids initial et le poids final rapporté au poids initial. La norme SN 670 835 [2] donne les informations concernant l'essai Los Angeles.

L'essai micro-Deval permet de mesurer l'évolution granulométrique d'un sable sous l'effet abrasif d'une charge de bille en acier. L'appareil est constitué de quatre cylindres en acier inox qui sont mis en rotation (vitesse de rotation 100t/min) par l'intermédiaire de deux arbres horizontaux. La charge abrasive est constituée par des billes sphériques en acier.

L'essai consiste à mesurer le rapport entre la masse séchée sans les refus 0.2 et 0.05 mm (M') d'un échantillon de sable ayant passé 15 minute dans le cylindre en rotation avec la charge abrasive, à la masse séchée de l'échantillon avant l'essai (M). Le rapport $100x(M'/M)$ est alors appelé le coefficient de friabilité du sable.

L'essai Deval, déterminant l'abrasivité des granulats, consiste à faire tourner dans une machine normalisée un certain nombre de pierres du granulat, pendant cinq heures, à raison de 2000 tours par heure. On lave ensuite les pierres sur un tamis de 1,6 mm, on les sèche puis on les pèse. La différence entre la pesée initiale et la pesée après manipulation est notée U . Le coefficient Deval est alors représenté par le rapport $400/U$. Plus le coefficient Deval est grand, et moins les granulats sont abrasifs.

6.2.2 Caractéristiques mécaniques des sols et essais permettant de les déterminer

Après avoir déterminé les caractéristiques des granulats entrant dans la composition du sol, il est intéressant de déterminer quelles sont les caractéristiques mécaniques de ce sol.

La classification USCS (Unified Soil Classification System, norme SN 670 008 [3]) permet de classer un sol en fonction de sa composition, puis en se référant à la norme SN 670 010 [4] d'en déterminer les valeurs des coefficients caractéristiques tels que la limite de liquidité, l'indice de plasticité, la masse volumique, la teneur en eau, l'angle de frottement effectif, la cohésion, la perméabilité,...

Dans le souci d'un dimensionnement adéquat pour l'utilisation routière du sol il faut considérer les caractéristiques suivantes du sol :

- la capacité portante
- la compactabilité
- la perméabilité
- la susceptibilité au gel
- la teneur en particules polluantes

CAPACITE PORTANTE

La capacité portante d'un sol est la mesure de l'aptitude d'un sol à supporter une charge. La capacité portante des sols sert de base au dimensionnement des structures routières et ferroviaires.

Les essais permettant de déterminer cette caractéristique sont :

- l'essai de plaque E_V et M_E
- l'essai CBR (California Bearing Ratio) in situ
- l'essai CBR en laboratoire

L'essai de plaque E_V et M_E permet de déterminer des courbes de charges-tassement, afin d'évaluer la déformabilité et la portance du sol. Il se réalise in situ par la mesure des tassements d'une plaque de 700cm^2 soumise à divers paliers de charge. La norme SN 670 317 [5]. présente en détail cet essai.

De manière générale, l'essai CBR consiste à mesurer la résistance au poinçonnement des sols dans des conditions bien déterminées. L'indice de portance CBR est un nombre sans

dimension exprimant, en pourcentage, le rapport entre les pressions produisant un enfoncement donné dans un matériau étudié d'une part, et dans un matériau type d'autre part.

L'essai CBR in situ permet d'estimer rapidement le coefficient de portance CBR d'un sol. Il se réalise à l'aide du pénétromètre CBR qui est enfoncé verticalement, à vitesse constante de 25mm/s dans le sol. Le coefficient est lu à différents niveaux jusqu'à une profondeur de 60cm. La norme SN 670 316 [6] présente en détails cet essai.

L'essai CBR en laboratoire permet de déterminer de façon précise le coefficient CBR d'un sol, servant de base pour le dimensionnement de la chaussée. Les explications détaillées concernant cet essai sont données dans la norme SN 670 320 [7].

COMPACTABILITE

La compactabilité d'un sol et l'aptitude du sol à être compacté, soit à diminuer sa teneur en vide et donc sa teneur en eau. Sous l'influence des charges permanentes, ou de surcharges ponctuelles, un sol a tendance à se resserrer, à se densifier, à se compacter. Il est donc souhaitable d'obtenir pour un sol un état de densité tel que les tassements ultérieurs soient éliminés ou du moins fortement diminués.

L'essai Proctor (AASHTO, American Association of State Highway and Transportation Official) a pour but de déterminer, pour un compactage d'intensité donnée, la teneur en eau à laquelle doit être compacté un sol pour obtenir la densité sèche maximum. L'essai consiste à compacter dans un moule standard, à l'aide d'une dame standard et selon un processus bien déterminé, un échantillon du sol à étudier et à déterminer la teneur en eau du sol et sa densité sèche après le compactage. La norme SN 670 330 [8] décrit l'appareillage et les essais permettant la détermination des valeurs de compactage.

PERMEABILITE

La perméabilité d'un sol représente la capacité du sol à laisser l'eau s'écouler à travers lui. Elle s'exprime à l'aide du coefficient de perméabilité k qui a la dimension d'une vitesse. La perméabilité du sol se mesure en laboratoire à l'aide d'un perméamètre en se basant sur la loi de Darcy. Les perméamètres peuvent être à charge continue ou à charge variable (mesure de faible perméabilité).

SUSCEPTIBILITE AU GEL

Un sol est qualifié de susceptible au gel lorsqu'il permet, dans des conditions climatiques de basses températures, la formation de lentille de glace. Celles-ci ont un effet très défavorable sur la capacité portante du sol en période de dégel pouvant causer des dégradations importantes au niveau du revêtement. L'essai de gonflement au gel et l'essai CBR après dégel (CBR_F) permettent de déterminer la susceptibilité au gel d'un sol et sont décrits dans la norme SN 670 321 [9].

TENEUR EN PARTICULES POLLUANTES

D'un point de vue environnemental les sols doivent se conformer à certaines directives, notamment concernant leur teneur en particules polluantes.

"Les polluants inorganiques que l'on rencontre dans le sol ne sont pas exclusivement d'origine anthropique; ils s'y trouvent naturellement en concentrations diverses. Ces polluants, issus de la roche mère, sont donc qualifiés de géogènes. En raison de la situation géologique complexe de la Suisse, les fortes variations régionales et surtout locales des concentrations géogènes de métaux lourds et de fluor sont caractéristiques du pays. Les concentrations naturelles de chrome, de cobalt, de plomb, de nickel, de zinc, de cadmium et de cuivre dans la couche supérieure du sol varient entre 15 et 110 % des valeurs indicatives correspondantes de l'ordonnance sur les polluants du sol (Osol). En ce qui concerne le fluor, on mesure souvent des teneurs géogènes atteignant 100 à 250 % de la valeur indicative de l'Osol." (Texte de l'OFEFP).

La définition des matériaux pollués ou non est donnée par :

- **Matériaux d'excavation pollués** : Les matériaux d'excavation sont réputés pollués quand ils sont contaminés de telle manière par des substances nuisibles pour l'environnement qu'une valorisation sans traitement préalable n'est pas autorisée. Les matériaux doivent être traités et mis en décharge selon les prescriptions de l'OTD et, le cas échéant, selon l'ordonnance sur les mouvements des déchets spéciaux (ODS).
- **Matériaux d'excavation tolérés** : Les matériaux d'excavation sont réputés tolérés quand leur composition est modifiée par des activités anthropiques et qu'ils sont contaminés par des substances nuisibles pour l'environnement de telle sorte qu'une valorisation avec quelques limitations est possible sans traitement préalable.

- **Matériaux d'excavation non pollués** : Les matériaux d'excavations sont réputés non pollués quand leur composition n'est pas modifiée par des activités anthropiques (humaines).

6.2.3 Caractéristiques des enrobés bitumineux et essais permettant de les déterminer

Les granulats sont pour une bonne part déterminant pour la résistance mécanique du béton bitumineux comme pour la qualité antidérapante de sa surface. Ainsi les caractéristiques spécifiques aux granulats (chap. 6.2.1) sont aussi en grande partie applicables.

Les exigences demandées pour les bétons bitumineux font souvent référence au type de liant utilisé. Nous n'allons pas ici développer cet aspect.

Les caractéristiques principales qu'un enrobé doit pouvoir assurer sont :

- La résistance aux déformations permanentes
- La qualité antidérapante

RESISTANCE AUX DEFORMATIONS PERMANENTES

De manière générale, les béton bitumineux doivent être conçus de manière à résister aux déformations permanentes (orniéage). Il est donc conseillé d'utiliser des granulats anguleux (matériaux concassés), l'angularité ayant un effet direct sur la résistance aux déformations permanentes. La présence de granulats anguleux dans un enrobé hydrocarboné augmente la résistance au cisaillement grâce au frottement interne plus élevé du squelette. Il est donc souhaitable d'utiliser dans les béton bitumineux destinés à la couche de roulement des granulats entièrement concassés, bien que ceux-ci peuvent parfois conduire à des enrobés difficile à compacter. La capacité d'un enrobé à résister aux déformations permanentes est vérifiée à l'aide d'un essai d'orniéage.

Cet essai consiste à mesurer l'ornière d'une plaque échantillon de l'enrobé soumise à un simulateur de charge (machine d'orniéage) à des conditions bien définies (température, nombre de passages).

QUALITE ANTIDERAPANTE - POLISSAGE

La qualité antidérapante des revêtements routiers est une caractéristique importante qui affecte directement la sécurité des usagers. Cette propriété de l'enrobé est obtenue en utilisant

des granulats à arêtes vives plutôt que des faces roulées. Mais il est important que la qualité antidérapante du revêtement soit assurée dans le temps. Il est donc nécessaire que les granulats anguleux utilisés dans les enrobés ne se polissent pas sous l'effet des charges de trafic. Le coefficient de polissage accéléré (CPA) caractérise l'aptitude des granulats utilisés en couche de roulement à se polir sous l'effet du trafic. Plus le coefficient CPA est important, et plus le granulat est sensible au polissage. *L'essai de polissage* permet de déterminer la valeur CPA.

L'essai de polissage, réalisé en laboratoire, consiste dans un premier temps à soumettre un échantillon de granulats (plaquette constituée d'une mosaïque de granulats enchâssés dans un support en résine époxy) à la machine de polissage, puis de mesurer la valeur du CPA, traduisant un essai de frottement sur la surface des granulats, à l'aide du pendule SRT (Skid Resistance Tester).

Plusieurs appareils permettent de déterminer la qualité antidérapante d'un revêtement in situ. On citera ici *le pendule SRT* et *l'appareil à roue tractée "Skidometer"*. Le Skidometer mesure les coefficients de frottement intervenant sur une roue tractée bloquée. Les normes SN 640 510 [10] et SN 640 511 [11] donnent respectivement les méthodes de mesures et les appréciations relatives à la qualité antidérapante des revêtements.

6.3 Exigences en fonction de l'utilisation

6.3.1 Utilisation en remblais non sollicités

Par remblais non sollicités on entend l'ensemble des remblais, qui une fois mis en place, ne subissent pas de charges extérieures. Une grande partie de ces remblais ne constituent pas une valorisation des matériaux de récupération (décharge, comblement, ...). D'autres cas peuvent être considérés comme valorisation. Dans cette catégorie on peut citer :

- Enrobage des canalisations en matériaux pulvérulents, ils doivent être réalisés avec un matériau compactable et en règle générale non cohérent (diamètre max. des grains selon norme SIA 190 [12]). Se référer à la norme SN 640 360 [13]
- Remblayage des murs de soutènement. Se référer à la norme SN 640 389 [14]
- Filtres pour drainage. Se référer à la norme SN 670 125 [15]
- Remblais divers (digue, tranchée couverte, ...). Pour leur mise en place la norme SN 640 576 [16] devra être appliquée.

Si du point de vue mécanique les matériaux ne doivent pas répondre à des exigences drastiques (il faudra toutefois vérifier que l'angle de frottement interne soit suffisant pour une mise en place en pente), ils doivent être conforme aux diverses directives et ordonnances visant à la protection de l'environnement. Nous citerons en particulier :

- l'ordonnance du 1^{er} juillet 1998 sur les atteintes portées aux sols (OSol)
- l'ordonnance du 28 octobre sur la protection des eaux (OEaux)
- l'ordonnance du 10 décembre 1990 sur le traitement des déchets (OTD)
- l'ordonnance du 12 novembre 1986 sur les mouvements de déchets spéciaux (ODS)
- l'ordonnance du 19 octobre 1988 relative à l'impact sur l'environnement (OEIE)
- la directive de l'OFEFP de juin 1999 sur la valorisation, le traitement et le stockage des matériaux d'excavation et déblais

Ces ordonnances et directives donnent les valeurs indicatives maximales des substances pouvant être contenues dans un sol, l'eau, A titre d'exemple, nous donnons à la Figure 6-3 les valeurs indicatives de la teneur en particules polluantes des matériaux d'excavation présentées dans la directive de l'OFEFP permettant de qualifier les matériaux comme étant non pollués et tolérés.

Paramètres	Valeur indicative maximales (mg/kg)
Arsenic (As)	40
Cadmium (Cd)	5
Chrome (Cr)	250
Chrome VI (Cr ^{VI})	0.05
Cuivre (Cu)	250
Mercure (Hg)	1
Nickel (Ni)	250
Plomb (Pb)	250
Zinc (Zn)	500
Cyanure, facilement libérale	0.1
Hydrocarbures chlorés (CKW)	0.2
Diphényles polychlorés (PCB)	0.1
Hydrocarbures aliphatique C ₅ à C ₁₀	5
Hydrocarbures aliphatique > C ₁₀	250
Hydrocarbures monocycliques aromatiques (BTEX)	5
Hydrocarbures polycycliques aromatiques (HAP)	15
Benzo(a)pyrène	1
Tert-butylméthyléther (MTBE)	0.1
Benzène	0.5

Figure 6-3 : Valeurs indicatives pour les matériaux d'excavation tolérés (pour plus de détails se référer à la directive).

D'autre part, les matériaux destinés à l'enfouissement sous un sol agricole doivent assurer de bonnes propriétés hydro-dynamiques, permettant un bon ressuyage après les pluies ainsi que le maintien de la réserve en eau du sol.

Des matériaux morainiques ou provenant de l'abrasion de roches dures (gneiss) conviennent bien, contrairement aux matériaux d'origine molassique ou provenant de roches karstiques. S'il est préférable de disposer d'une certaine quantité de gravier pour assurer un bon drainage du terrain, un matériel à dominante sableuse peut également bien convenir. Dans tous les cas, la contrainte principale est liée à la proportion maximale de particules dont le diamètre est inférieur à 0.06mm. La teneur en argile doit donc rester infime (quelques % seulement) et la

teneur en limon ne doit pas dépasser 10%. La taille et la proportion des éléments grossiers seront limités par les contraintes de mise en place.

6.3.2 Utilisation en remblais routiers et ferroviaires

Les matériaux de remblais routiers et ferroviaires sont composés de matériaux de nature pierreuse, exempts de limon, d'argile ou de matière organique. Les exigences relatives à ces remblais concernent essentiellement leur capacité portante après compactage et dans certains cas, leur susceptibilité au gel.

En fonction de la valeur de son module de compressibilité M_E , le sol est classé dans une classe de portance (S0 à S4 selon la Figure 6-4). Pour qu'un sol puisse être utilisé tel quel comme couche de forme, il doit au minimum appartenir à la classe de portance S2, ce qui représente un module de compressibilité M_E de 15 MN/m².

Classe de portance		M_{E1} [kN/m ²]	CBR [%]	Module de réaction k [MN/m ³]
S0	Très faible	< 6000	< 3	< 15
S1	Faible	> 6000...15000	3...6	15...30
S2	Moyenne	> 15000...30000	> 6...12	> 30...60
S3	Elevée	> 30000...60000	> 12...25	> 60...100
S4	Très élevée	> 60000	> 25	> 100

Figure 6-4 : Classes de portance

Si les sols ne satisfont pas aux valeurs minimales exigées par la norme SN 640 585 [17], il se peut que l'on puisse y remédier en effectuant une stabilisation du sol. Pour ce faire, le sol doit répondre à un fuseau granulométrique bien défini qui est donné par la norme SN 640 500 [18].

Dans les zones climatiquement fortement sollicitées en hivers, il est nécessaire que les matériaux de remblais mis en place ne soient pas susceptibles au gel (classe de gélivité G1 et G2). En fonction du coefficient de gonflement du sol (CBR_F) on détermine son degré de gélivité (Figure 6-5).

Coefficient de gonflement	Degré de gélivité
< 0.1	G1 : très faible
0.1 à 0.4	G2 : faible
0.4 à 0.8	G3 : moyen
> 0.8	G4 : fort

Figure 6-5 : Degré de gélivité en fonction du coefficient de gonflement

Lors du dimensionnement des chaussées il faudra tenir compte de la problématique du gel en appliquant les normes SN 640 324 [19] et SN 670 140 [20].

6.3.3 Utilisation dans les couches de fondations routières et ferroviaires

De manière générale, la couche de fondation routière ou ferroviaire doit présenter, après compactage, un M_E minimal de 80 MN/m^2 . Si la couche de fondation ne satisfait pas à cette condition minimale donnée par la norme SN 640 585 [17], il se peut que l'on puisse y remédier en effectuant une stabilisation du sol. Pour ce faire, le sol doit répondre à un fuseau granulométrique bien défini qui est donné par la norme SN 640 500 [18].

La couche de fondation est généralement constituée de grave, mélange de gravier et de sable. Mais elle peut aussi être remplacée, en fonction du trafic (fortes sollicitations), par un enrobé HMF.

De même que pour les remblais sollicités, les matériaux pour couches de fondation doivent répondre à des critères de compactage et de gel, mais doivent en plus, en fonction de leur utilisation, répondre à une granulométrie bien précise.

EXIGENCES RELATIVES A LA GRAVE

Il existe trois types de graves normalisées pouvant être utilisés comme couche de fondation pour les structures routières et ferroviaires. Ce sont :

Grave I : matériau naturel ou recyclé qui, compte tenu des prescriptions de qualité, sera préparé et dosé sur la base d'un fuseau granulométrique étroit.

Grave II : matériau naturel ou recyclé pour lequel une tolérance plus grande est admise pour le fuseau granulométrique. Des essais doivent démontrer que les exigences de qualité sont atteintes.

Grave PSS : matériau naturel recomposé. Elle est utilisée là où, en raison des exigences d'exploitation, l'on ne peut mettre en place qu'une seule couche sous la voie existante. La teneur en eau doit se situer dans la fourchette de W_{opt} à W_{opt} moins 2%.

La norme SN 670 120 [21] donne les exigences de qualité requises (fuseau granulométrique, teneur en grains de grande dimension, aptitude au compactage, coefficient CBR, forme des grains, teneur en éléments tendres, impuretés) pour chacune des graves que la Figure 6-6 résume.

Propriété des matériaux		Grave I	Grave II	Grave PSS
Granulométrie				
Dimension du grain le plus grand		16 à 63 mm	16 à 90 mm	16 à 63 mm
Teneur en grain de grande dimension :				
Fraction passante pour une ouverture de tamis D		85 à 90 %	80 à 99 %	85 à 99 %
Fraction passante pour une ouverture de tamis 1.4 D		100 %		100 %
Fraction passante pour une ouverture de tamis 2.0 D			100 %	
Fines				
Part < 0.063 mm		≤ 5% de la masse	≤ 12% de la masse	≤ 12% de la masse
Propriété des fines				
Limite de liquidité			≤ 25 WL en %	
Indice de plasticité			≤ 6 IP en %	
Aptitude au compactage			Dans le doute, à démontrer par une planche d'essais	A démontrer par une planche d'essais
Perméabilité k en cas de compactage selon la méthode AASHTO Standard			≥ 10 ⁻³ m/s, à démontrer en laboratoire ou par une planche d'essais	≥ 10 ⁻⁶ m/s, à démontrer en laboratoire ou par une planche d'essais
Exigences CBR selon chiffre 12	Pour 3 à 5 % de fines :	≤ 40 % resp.	≤ 40 % resp.	≤ 40 % resp.
CBR ₂ , respectivement CBR _F		≤ 80 % pour des matériaux concassés	≤ 80 % pour des matériaux concassés	≤ 80 % pour des matériaux concassés
CBR ₂ , resp. CBR _F	Pour 3 à 5% de fines :	≤ 0.5	≤ 0.5	≤ 0.5
CBR ₁ , resp. CBR ₁				
Forme des grains				
Non sphérique, respectivement non cubique		≤ 50 nombre en %		
Teneur en éléments tendres				
Augmentation des fines < 0.063 mm		≤ 2 % de la masse, en valeur absolue	≤ 3 % de la masse, en valeur absolue	≤ 2 % de la masse, en valeur absolue
Impuretés		Aucune visible	Aucune visible	Aucune visible
Impuretés dommageables pour l'environnement		Aucune	Aucune	Aucune

CBR₁ = coeff. CBR [%] après compactage

CBR₂ = coeff. CBR [%] après compactage et 4 jours dans l'eau

CBR_F = coeff. CBR [%] après compactage, 4 jours dans l'eau et un cycle de gel/dégel

Figure 6-6 : Exigences pour les graves normalisées destinées aux couches de fondation

EXIGENCES RELATIVES AU HMF (HEISSMISCHFUNDATIONSSCHICHT)

L'enrobé à chaud HMF est utilisé en couche de fondation pour renforcer la superstructure. Des matériaux de première utilisation (granulats minéraux, grave) ou des matériaux récupérés (granulat d'enrobés, grave recyclée) peuvent être utilisés pour leur conception. La qualité des granulats doit répondre aux exigences de la norme SN 670 130 [25].

Selon la valeur nominale du plus gros grain, trois sortes d'enrobés sont définies (HMF 16/22/32). Les caractéristiques relatives à chacun de ces enrobés (granularité, dosage du liant, valeur Marshall, ...) sont données dans la norme SN 640 452 [22].

Concernant l'utilisation des bétons bitumineux pour les voies de chemin de fer, ils servent surtout comme couche d'étanchéité sous le ballast.

6.3.4 Utilisation dans les bétons bitumineux

Les bétons bitumineux sont des mélanges homogènes constitués à chaud de granulats minéraux, de filler et de liant bitumineux. Leur utilisation est essentiellement dans la réalisation du revêtement des chaussées, qui se compose généralement de deux couches, à savoir la couche de support et la couche de surface. Les exigences relatives aux bétons bitumineux ne refléteront ici que les caractéristiques des matériaux pierreux, car seuls ceux-ci peuvent provenir de récupération de matériaux de tunnel.

Pour les caractéristiques relatives aux bétons bitumineux (composition) il faudra se référer à la norme SN 640 431 [23], alors que les exigences relatives à l'élaboration des fillers sont données dans la norme SN 670 135 [24].

EXIGENCE RELATIVES A LA COUCHE DE SUPPORT

Les bétons bitumineux constituant la couche de support sont désignés par HMT. Les exigences relatives aux granulats utilisés sont données par la norme SN 670 130 [25] et sont résumées dans la Figure 6-7.

Caractéristique		Exigence		
Pétrographie	Plaquette de mica grossière > 3mm	Valeur maximale en % de la masse	2	
	Paillettes de mica, schistes à mica et à chlorite, schiste talqueux et argileux		5	
	Grains ou cristaux tendres, poreux ou altérés comme p. ex. calcite à gros cristaux, grès molassiques tendres et calcaires marneux		10	
Dureté	Pour les enrobés de type S (sollicitations sévères) et H (sollicitations très sévères)	Minimum de grains de roche dure en %	60	
Los Angeles	Classe granulaire	Valeur maximale du coefficient Los Angeles	3/6	25
			6/11	25
			11/16	23
			16/22	23
			22/32	23
Impureté	Bois et autres restes végétaux	Teneur maximale admissible en ‰ de la masse	0.2	
Forme	Non cubique ou non sphérique	Fourchette admissible pour chaque fraction isolée en % de la masse	20...50	
Arrondi	Semi-arrondi	Quantité maximale admissible en % du nombre de grains	33	
	rond		2	
Polissage		Valeur minimale du coefficient PSV	45	
Granulométrie	Type de HMT	Courbes granulométriques	HMT 11	
			HMT 16	
			HMT 22	
			HMT 32	

Figure 6-7 : Exigences relatives aux granulats pour les couches de support HMT (SN 670 130 [25])

EXIGENCES RELATIVES A LA COUCHE DE SURFACE

La couche de surface doit essentiellement résister à l'usure et assurer de bonnes caractéristiques d'adhérence. Les gravillons situés à la surface de la chaussée doivent avoir une texture superficielle rugueuse et des arêtes vives pour que la couche de roulement ait des caractéristiques de rugosité suffisante, et doivent pouvoir garder ces propriétés dans le temps.

En fonction des sollicitations auxquelles la couche sera soumise (climat, trafic,...) ainsi que des caractéristiques souhaitées (bruit, drainabilité,...) ont distingué plusieurs types de bétons bitumineux. Les plus courants sont les bétons bitumineux de type AB (Asphaltbeton). Les exigences relatives aux granulats utilisés sont données par la norme SN 670 130 [25] et sont présentées dans le tableau ci-dessous.

Caractéristique		Exigence		
Pétrographie	Plaquette de mica grossière > 3mm	Valeur maximale en % de la masse	0	
	Paillettes de mica, schistes à mica et à chlorite, schiste talqueux et argileux		2	
	Grains ou cristaux tendres, poreux ou altérés comme p. ex. calcite à gros cristaux, grès molassiques tendres et calcaires marneux		6	
Dureté	Pour les enrobés de type S et H	Minimum de grains de roche dure en %	60	
Los Angeles	Classe granulaire	Valeur maximale du coefficient Los Angeles	H,S N,L	
			3/6	20 23
			6/11	20 23
			11/16	18 21
			16/22	- -
22/32	- -			
Impureté	Bois et autres restes végétaux	Teneur maximale admissible en ‰ de la masse	0.1	
Forme	Non cubique ou non sphérique	Fourchette admissible pour chaque fraction isolée en % de la masse	20...50	
Arrondi	Semi-arrondi	Quantité maximale admissible en % du nombre de grains	H,S N,L	
	rond		25 33	
Polissage		Valeur minimale du coefficient PSV	1 2	
Granulométrie	Type de AB	Courbes granulométriques	AB 3	
			AB 6	
			AB 11	
			AB 16	

L, N, S, H : sollicitations légères, normales, sévères, très sévères

Figure 6-8 : Exigences relatives aux granulats pour les couches de roulement AB (SN 670 130 [25])

On peut également réaliser les couches de roulement suivantes :

- Splittmastixasphalt (SMA) qui sont utilisées lorsque les surfaces de roulement sont très sollicitées. Les caractéristiques granulométriques pour ce type d'enrobé doivent satisfaire aux exigences demandées pour une couche de roulement en béton bitumineux de type S (voir Figure 6-8). La norme SN 640 432 [26] donne les exigences particulières de l'enrobé.
- Les enrobés macrorugueux (MR) qui sont également utilisés pour des surfaces de roulement très sollicitées. Les caractéristiques granulométriques pour ce type d'enrobé doivent satisfaire aux exigences demandées pour une couche de roulement en béton bitumineux de type S (voir Figure 6-8). Les exigences de l'enrobé sont données dans la norme SN 640 435 [27].
- Les enrobés drainants (DRA, Drainasphalt) qui sont caractérisés par une forte teneur en vides et qui permettent l'écoulement de l'eau de pluie à travers l'épaisseur de la couche. Les caractéristiques granulométriques pour ce type d'enrobé doivent satisfaire aux exigences demandées pour une couche de roulement en béton bitumineux de type S (voir Figure 6-8). La norme SN 640 433 [28] donne les exigences particulières à ce type d'enrobé.

La principale différence entre ces types, relative aux matériaux pierreux, est la composition de leur courbe granulométrique.

6.3.5 Utilisation dans le béton et béton de ciment routier

Dans le cas d'une utilisation des granulats pour du béton ou du béton de ciment routier, les prescriptions relatives aux ouvrages en béton (SIA 162 [29] et SIA 162/1 [30]) sont à appliquer ainsi que les exigences de la norme SN 640 461 [31]. Quelques exigences granulométriques sont données dans le tableau suivant.

Caractéristique		Exigence	
Péetrographie	Plaquette de mica grossière > 3mm	Valeur maximale en % de la masse	2
	Paillettes de mica, schistes à mica et à chlorite, schiste talqueux et argileux		5
	Grains ou cristaux tendres, poreux ou altérés comme p. ex. calcite à gros cristaux, grès molassiques tendres et calcaires marneux		6
Impureté	Bois et autres restes végétaux	Teneur maximale admissible en % de la masse	0.01
	Humus rapporté à la fraction sable		0.05
	Sulfate (SO ₃)		1
	Teneur en sulfate soluble dans l'eau		0.1
Forme	Non cubique ou non sphérique	Fourchette admissible pour chaque fraction isolée en % de la masse	0...45

Figure 6-9 : Quelques exigences granulométriques pour les revêtements en béton

6.4 Référence

- [1] Norme SN 670 810 : Granulats minéraux et sols, analyse granulométrique par tamisage
- [2] Norme SN 670 835 : Granulats minéraux, essai Los Angeles
- [3] Norme SN 670 008 : Identification des sols, méthode de laboratoire avec classification selon l'USCS
- [4] Norme SN 670 010 : Coefficients caractéristiques des sols
- [5] Norme SN 670 317 : Sols, essai de plaque E_V et M_E
- [6] Norme SN 670 316 : Essais sur les sols, pénétromètres CBR, essais in situ
- [7] Norme SN 670 320 : Essais sur les sols, essais CBR en laboratoire
- [8] Norme SN 670 330 : Essais, compactage selon AASHTO
- [9] Norme SN 670 321 : Essais sur les sols, essai de gonflement au gel et essai CBR après dégel (CBR_F)
- [10] Norme SN 640 510 : Qualité antidérapante, méthode de mesure
- [11] Norme SN 640 511 : Qualité antidérapante, appréciation
- [12] Norme SIA 190 : Canalisations
- [13] Norme SN 640 360 : Evacuation des eaux, collecteurs et drainages, prescriptions d'exécution
- [14] Norme SN 640 389 : Murs de soutènement, assainissement et remblayage
- [15] Norme SN 670 125 : Matériaux pour filtre, prescription de qualité
- [16] Norme SN 640 576 : Remblais et déblais, prescriptions d'exécution
- [17] Norme SN 640 585 : Compactage, exigences
- [18] Norme SN 640 500 : Stabilisation, généralités
- [19] Norme SN 640 324 : Dimensionnement, superstructure des routes
- [20] Norme SN 670 140 : Gel
- [21] Norme SN 670 120 : Graves pour couches de fondation, exigences de qualité
- [22] Norme SN 640 452 : Couches de fondation à chaud HMF

- [23] Norme SN 640 431 : Revêtement en béton bitumineux, exigences
- [24] Norme SN 670 135 : Filler pour enrobés bitumineux, prescriptions de qualité
- [25] Norme SN 670 130 : Sables, graviers, gravillons et pierres concassées pour revêtement, exigences de qualité
- [26] Norme SN 640 432 : Couches de roulement en Splittmastixasphalt
- [27] Norme SN 640 435 : Couches de roulement en enrobé macrorugueux
- [28] Norme SN 640 433 : Couches de roulement en enrobé bitumineux drainant
- [29] Norme SIA 162 : Ouvrages en béton
- [30] Norme SIA 162/1 : Ouvrages en béton, examen des matériaux
- [31] Norme SN 640 461 : Revêtements en béton

7. Etat de la pratique actuelle (résultats de l'enquête)

7.1 Déroutement de l'enquête

7.1.1 Questionnaire préliminaire

Dans un premier temps, un questionnaire sommaire a été envoyé le 20 juillet 1999 aux principaux maîtres d'ouvrage (routes nationales, CFF, administrations cantonales, sociétés ferroviaires privées) ainsi qu'à de nombreux bureaux et entreprises susceptibles d'avoir une expérience en matière de valorisation de matériaux excavés. Le but de ce questionnaire était de prendre un premier contact avec les futurs interlocuteurs de l'enquête. Un exemple de questionnaire est donné à l'Annexe 1.

Sur les 109 questionnaires envoyés, 51 nous ont été retournés. Nous avons ainsi pu établir une liste de 87 ouvrages pour lesquels une réutilisation des matériaux a été réalisée ou projetée (voir Annexe 2). La répartition des réponses par utilisation est donnée à la Figure 7-1.

Parmi ces ouvrages :

- 17 sont en projet (pas de retour d'expérience)
- 32 ont fait l'objet d'une seule utilisation, ou ne concernent pas le domaine d'utilisation visé (domaine routier)
- 3 ont fait l'objet d'une utilisation sans traitements
- 5 ont engendré une utilisation marginale (moins de 10% des matériaux réutilisés)
- 8 faisaient partie d'une liste d'ouvrages dont d'autres étaient plus intéressants (contacts déjà suffisamment sollicités)
- 2 n'étaient pas intéressants pour des raisons diverses
- 14 ont fait l'objet d'un questionnaire complet
- 6 étaient assez documentés, et ne justifiaient pas un déplacement.

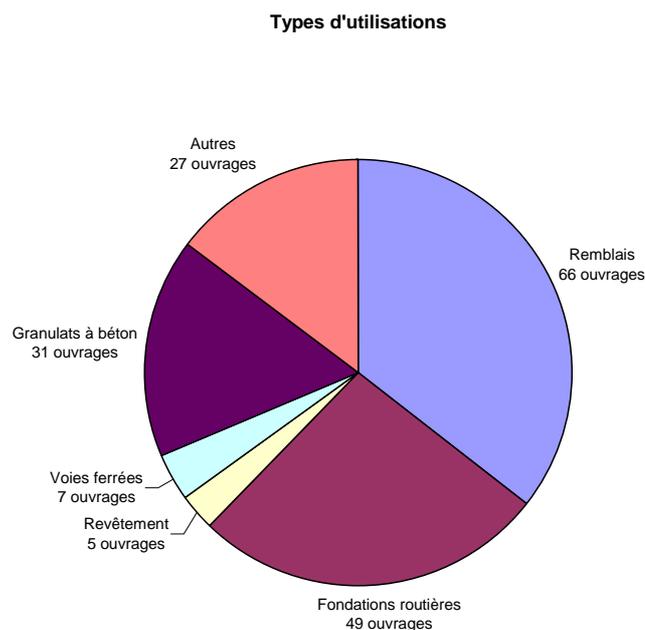


Figure 7-1 : Questionnaire préliminaire - répartition des types d'utilisations

La majeure partie des utilisations mentionnées consiste en des remblais ou fondations routières.

Parmi les ouvrages pour lesquels on a annoncé une utilisation du marin sous forme de granulats à béton, on trouve une quantité importante de tunnels dans lesquels on a fait uniquement des essais de fabrication (essais préliminaires pour les NLFA par exemple), ainsi que des ouvrages en projet. En réalité, seuls 17 ouvrages ont à l'heure actuelle donné réellement lieu à la production de granulats.

Sous la rubrique "autre" figurent des expériences de noyage, de fabrication de clinker en cimenterie, d'améliorations de terrains agricoles, de comblements de gravières ou de mise en décharge.

7.1.2 Enquête

Un questionnaire détaillé concernant les caractéristiques et les particularités de la réutilisation des matériaux des 14 ouvrages objets de l'enquête (voir liste à la Figure 7-2) a servi de base aux entretiens avec les différents interlocuteurs sélectionnés. Ces entretiens ont eu lieu entre septembre et décembre 1999. On trouvera les questionnaires remplis à l'Annexe 3.

7.2 Résultats de l'enquête

7.2.1 Ouvrages étudiés

	Ouvrage / canton	Type d'ouvrage / tronçon	Géologie prédominante	Mode d'excavation principal	Types d'utilisations
Ouvrages objets de l'enquête	Cleuson-Dixence / VS	Galerie hydraulique / Cleuson-Dixence	Prasinite	Tunnelier	Granulats à béton
	Crapteig / GR	Route / N13	Calcaires	Explosif	Granulats à béton, graves routières
	Vernayaz / VS	Galerie hydraulique / Salvan-Vernayaz	Grès schisteux	Tunnelier	Remblais routiers, granulats pour béton de remplissage, construction de routes forestières
	Géronde / VS	Route / N9	Terrains meubles (calcaires)	Haveuse	Graves routières
	Gorgier / NE	Route / N5	Calcaires, marnes	Tunnelier	Amélioration de rives lacustres, fabrication de ciment, remodelages de terrains, remblais routiers
	Grauholz / BE	Rail / Berne – Mattsteten	Molasse, moraines	Tunnelier (bouclier à pression de boue)	Vente à gravières, remblais ferroviaires.
	Lötschberg (sud) / VS	Rail / BLS	Gneiss, amphibolites, granites, calcaires marneux	Tunnelier, explosif	Granulats à béton, graves diverses, remblais routiers, remblais ferroviaires
	Mt Terri / JU	Route / N16	Molasse gréseuse, calcaires, marnes	Haveuse, explosif	Remodelages de terrains, remblais routiers, remblais ferroviaires, chaille, graves drainantes
	Plantzette / VS	Route / N9	Terrains meubles (calcaires)	Haveuse	Graves routières
	Sauges / NE	Route / N5	Calcaires, marnes	Tunnelier	Amélioration de rives lacustres, fabrication de ciment, remodelages de terrains, remblais routiers
	Vereina (nord) / GR	Rail / RhB	Gneiss, amphibolites	Tunnelier	Granulats à béton, graves routières, ballast ferroviaire, remblais divers
	Vernier / GE	Route	Molasse, moraine graveleuse	Haveuse	Remblais (avec molasse), vente à gravières (moraine graveleuse)
	Vue-des-Alpes / NE	Route / J20	Calcaires, marnes	Explosif	Granulats à béton, remodelages de terrains, graves routières, matériaux de drainage
Zürcher S-Bahn / ZU	Rail	Molasse, graviers	Sous-œuvre	Granulats à béton (graviers sélectionnés)	
Ouvrages tirés de la littérature	Ruggen / BE	Route / N8	Sédiments, calcaires jurassiques (Malm)	Explosif	Graves de fondation et routière, matériaux de drainage
	Giessbach / BE	Route / N8	Sédiments, calcaires jurassiques (Malm)	Explosif	Grave de fondation, granulats à béton (mêlés à des granulats roulés)
	Chüebalm / BE	Route / N8	Sédiments, calcaires jurassiques (Malm)	Explosif	Graves de fondation et routière, matériaux de drainage, granulats à béton (béton fabriqué avec 100% de matériaux concassés)
	Sengg / BE	Route / N8	Sédiments, calcaires jurassiques (Malm)	Explosif	Graves de fondation et routière, matériaux de drainage, granulats à béton (béton fabriqué avec 100% de matériaux concassés)
	Mappo-Moretina / TI	Route / N13	Gneiss, amphibolite	Tunnelier	Rehaussement de terrains agricoles

Figure 7-2 : Ouvrages retenus pour la suite de l'étude

Les ouvrages retenus pour la suite des études sont donnés à la Figure 7-2 (voir aussi la Figure 7-3). On trouvera les questionnaires remplis des 14 ouvrages objets de l'enquête à l'annexe 4.

7.2.2 Situation géographique

La Figure 7-3 donne la répartition géographique des tunnels considérés pour la suite de l'étude.

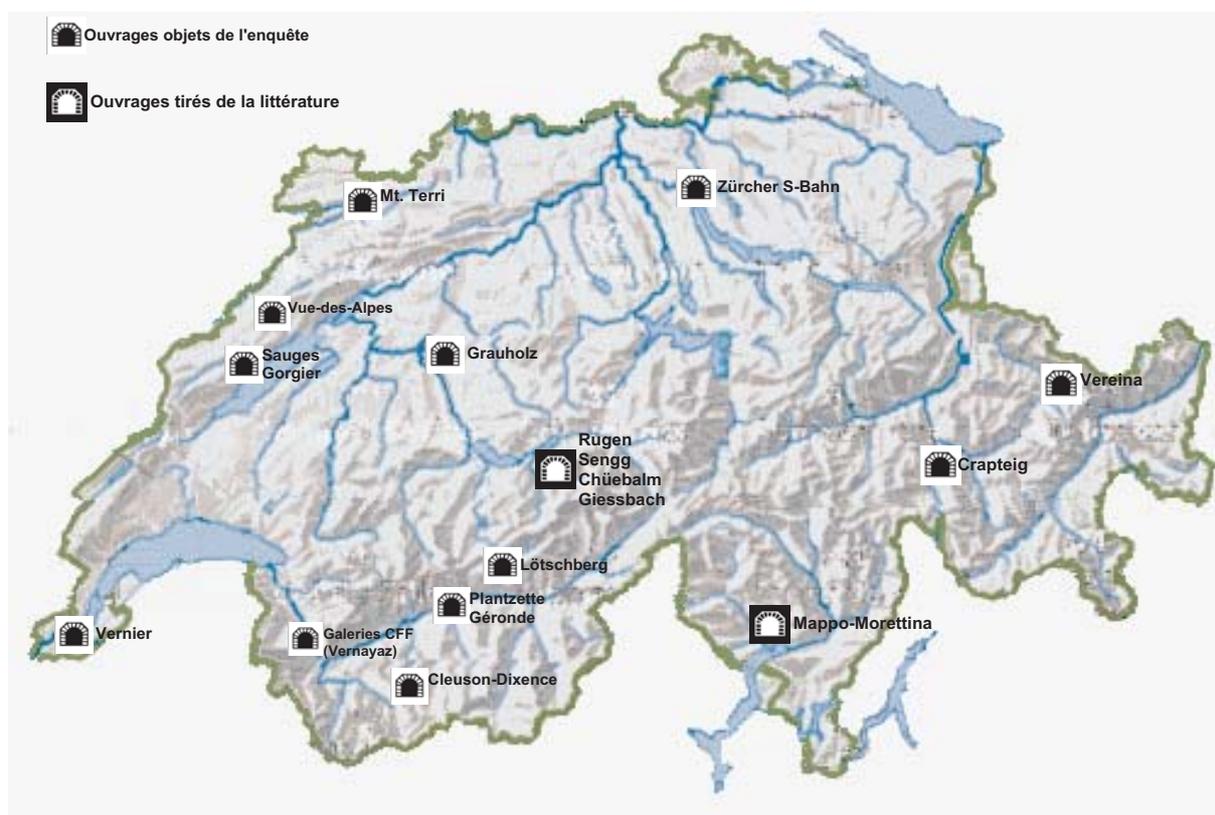


Figure 7-3 : Répartition géographique des tunnels considérés

7.2.3 Caractéristiques des ouvrages

On donne à la Figure 7-4 les caractéristiques principales des 14 ouvrages ayant fait l'objet d'un questionnaire détaillé et des 6 ouvrages traités dans la littérature.

	Tunnel	Longueur [m]	Nombre de tubes	Section excavée par tube [m ²]	Volume total excavé [m ³ en place]
Ouvrages objets de l'enquête	Cleuson-Dixence	15 850	1	18	222 800
	Crapteig	2 200	1	125	300 000
	Vernayaz	2 350	1	5.75	25 500
	Géronde	375	2	100	98 000
	Gorgier	2 700	2	105	628 000
	Grauholz	5 548	1	106	582 000
	Lötschberg (sud)	17 400	2	77.5	3 640 500
	Mt Terri	4 068	1	110	700 000
	Plantzette	584	2	100	177 000
	Sauges	1 910	2	105	375 000
	Vereina (nord)	13 500	1	48	650 000
	Vernier	1 900	2	101	393 000
	Vue-des-Alpes	4 900	1	84	400 000
	Zürcher S-Bahn	Gare « Museumsbahnhof »			Env. 320 000
Ouvrages tirés de la littérature	Rugen	780	2	67.5	105 300
	Giessbach	3 340	1	70	233 800
	Chüebalm	1 340	1	69.5	93 100
	Sengg	830	1	69.5	57 700
	Mappo-Moretina	5 518	1	92	508 000

Figure 7-4 : Caractéristiques des ouvrages sélectionnés pour l'enquête

7.2.4 Motivations

Les motivations invoquées pour l'élaboration d'un projet d'utilisation des matériaux excavés sont principalement économiques (réduction des coûts des matériaux de construction, limitation des distances de transports, économies sur les taxes de décharge) et écologiques (voir Figure 7-5). Il ressort également de l'enquête que les maîtres d'ouvrages sont souvent conscients des problèmes liés à l'élimination du marin, et demandent aux projeteurs des solutions autres que le "tout en décharge".

Dans plusieurs cas, c'est la qualité des matériaux excavés qui a dicté leur valorisation, qui n'était pas prévue initialement. Si l'on se réfère à la norme SIA 199, la question de la

réutilisation des matériaux devrait être intégrée aux prévisions géologiques. La tendance est donc au développement de projets de réutilisations intégrés aux projets de tunnels déjà au stade des études préliminaires.

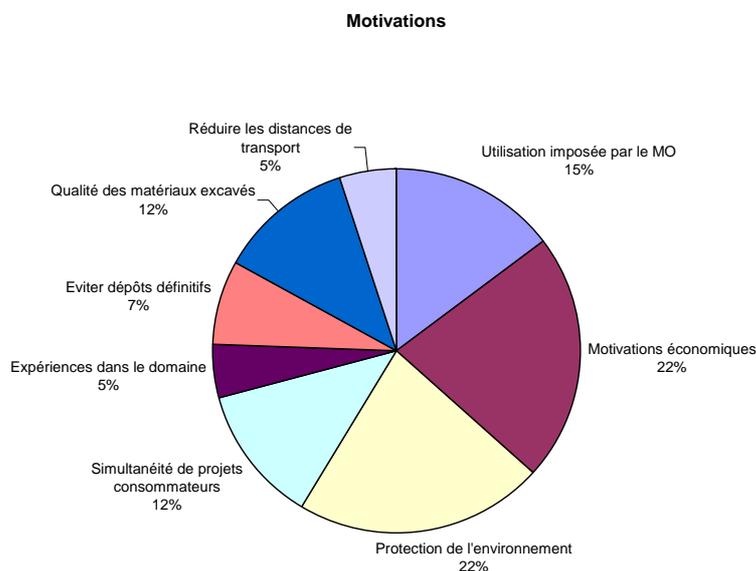


Figure 7-5 : Raisons de l'établissement des projets d'utilisation des matériaux (source : enquête)

7.2.5 Utilisations réalisées

Dans les ouvrages analysés, on a utilisé les matériaux dans 6 domaines :

- Fabrication d'agrégats à béton
- Fabrication de graves routières
- Utilisation comme matériaux de remblais
- Noyage, à savoir remplissage d'anciennes fosses de dragage et protection de rives lacustres contre l'érosion
- Fabrication de ciment (clinker)
- Construction de chaussées forestières.

On donne à la Figure 7-6 la répartition de ces types d'utilisations, ainsi que des quantités de matériaux correspondantes. Il est clair que ces répartitions ne reflètent pas la pratique générale, les ouvrages sujets à l'enquête ayant été sélectionnés en privilégiant les utilisations les plus intéressantes.

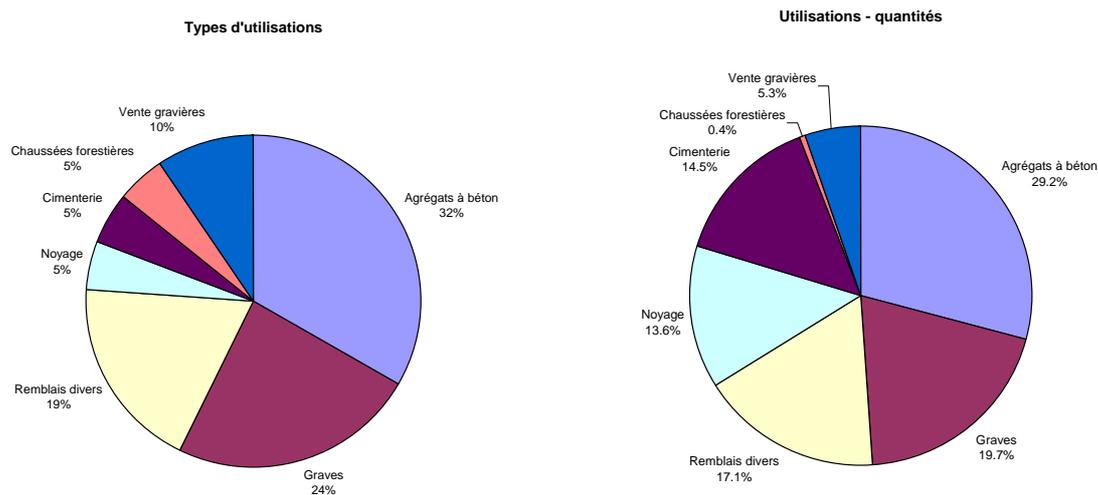


Figure 7-6 : Répartition des types d'utilisations (à gauche) et des quantités correspondantes (à droite)

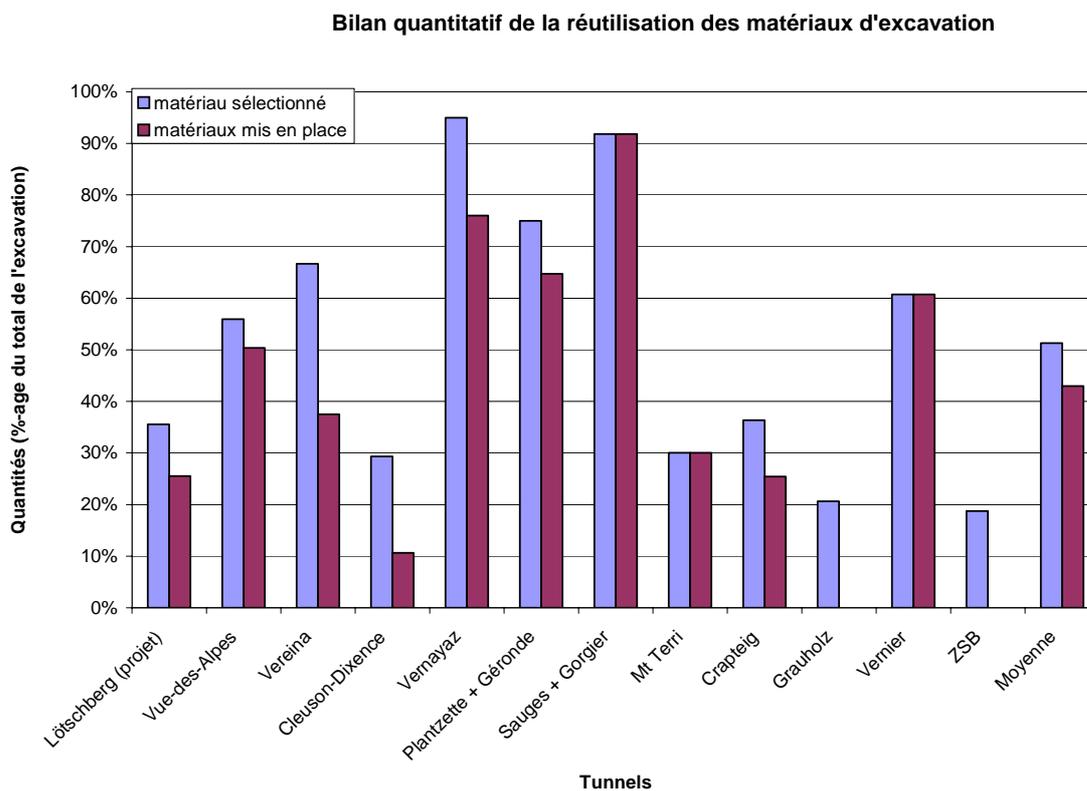


Figure 7-7 : Bilan quantitatif de l'utilisation des matériaux excavés

La Figure 7-7 donne les quantités, rapportées au total de l'excavation, des matériaux excavés sélectionnée pour la réutilisation et des matériaux effectivement mis en place, pour les 14 ouvrages soumis à l'enquête. En moyenne, environ 45 % des matériaux ont été déclarés

propres aux utilisations prévues. Les processus de transformation des matériaux bruts en produits finis prêts à l'emploi induisent une part de déchets d'environ 25 % en moyenne.

	Tunnel	Types d'utilisation	Mode d'excavation	Part de matériaux sélectionnés	Rendement des installations
Ouvrages objets de l'enquête	Lötschberg	Agrégats à béton, graves	Tunnelier, explosif	30 %	71 %
	Vue-des-Alpes	Remblais, graves, agrégats à béton	Explosif	56 %	90 %
	Vereina	Agrégats à béton, graves	Tunnelier	67 %	56 %
	Cleuson-Dixence	Agrégats à béton	Tunnelier	29 %	36 %
	Vernayaz	Agrégats à béton de remplissage, graves, remblais	Tunnelier	95 %	80 %
	Plantzette + Géronde	Graves	Haveuse	75 %	87 %
	Sauges + Gorgier	Noyage, ciments	Tunnelier	92 %	100 %
	Mt Terri	Remblais	Haveuse, tunnelier, explosif	30 %	100 %
	Crapteig	Agrégats à béton, graves	Explosif	36 %	70 – 75 %
	Vernier	Remblais, vente à gravières	Haveuse	61 %	?
	Zürcher S-Bahn	Vente à gravières (agrégats à béton)	Terrassements en sous-œuvre	51 %	?
Grauholz	Vente à gravières	Tunnelier	21 %	?	
Ouvrages tirés de la littérature	Rugen	Graves	Explosif	Pas de données exploitables	
	Giessbach	Graves, granulats à béton	Explosif		
	Chüebalm	Graves, granulats à béton	Explosif		
	Sengg	Graves, granulats à béton	Explosif		
	Mappo-Moretina	Rehaussement de terrains agricoles	Explosif		

Figure 7-8 : Rendements des installations

Comme le montre la Figure 7-8, donnant le "rendement" des installations de traitement, soit le rapport entre la quantité de matériaux fabriqués et la quantité de matériaux entrant dans la chaîne de fabrication, en fonction du type d'utilisation et du mode d'excavation, plus l'utilisation est "poussée", plus la part de déchets est importante, et moins la part de matériau sélectionné est grande. Ainsi, pour la fabrication de granulats à béton, les traitements produisent des déchets qui représentent 29 % (Lötschberg, prévision) à 64 % (Cleuson-Dixence) de la quantité de matériau sélectionné. La grande part de déchets produits à Cleuson-Dixence peut s'expliquer par le fait que la quantité de matériau à disposition était supérieure aux besoins. Le processus de fabrication aurait pu être optimisé pour produire moins de déchets. Dans le cas des tunnels de Sauges et Gorgier (92 % des matériaux sélectionnés), on trouve dans le noyage deux types de matériaux : les andains de stabilisation, qui doivent répondre à certaines exigences (calcaires), et des matériaux de remplissage. Si l'on ne tient pas compte de ces derniers (noyage équivalent à mise en décharge), la part de matériaux sélectionnés est ramenée à 79 %.

7.2.6 Méthodologies de la sélection des matériaux

	Tunnels	Principe de la sélection	Type d'examen visuel, précision de la sélection
Ouvrages objets de l'enquête	Cleuson-Dixence	Examen visuel, pétrographie, essais de dureté (voir Figure 7-16)	Appréciation de la granulométrie du marin, du type de roche, de sa schistosité et sa friabilité
	Crapteig	Examen visuel, analyse pétrographique	Détermination de la teneur en calcschistes et phyllites (T). T < 6% : matériau propre à la fabrication de granulats à béton ou de grave I. 6% < T < 30% : matériau "de réserve", transformable en grave II. T > 30% : matériau mis en décharge.
	Vernayaz	Examen visuel, matériaux contenant du charbon mis en décharge	Détection de la présence de charbon. Présence de charbon → matériau mis en décharge.
	Géronde, Plantzette	Examen visuel	Appréciation de la granulométrie et de la pétrographie. Matériau trop fin → mis en décharge. Matériau schisteux → mis en décharge.
	Gorgier, Sauges	Examen visuel	Détection de la présence de marnes. Présence de marnes → matériau noyé ou mis en décharge.
	Lötschberg (sud)	Examen visuel, essais de broyabilité et de dureté, pétrographie (voir Figure 7-17)	
	Mt Terri	Examen visuel	Détection de la présence de marnes. Présence de marnes → matériau mis en décharge.
	Vereina	Examen visuel, analyse pétrographique	Détermination de la teneur en matériaux tendres (T). T < 5% : matériau sélectionné.
	Vue-des-Alpes	Examen visuel	Détection de la présence de marnes. Présence de marnes → matériau mis en décharge.
	Vernier	Matériaux graveleux : examen visuel Molasse : pas de sélection	Appréciation de la granulométrie.
	Zürcher S-Bahn	Examen visuel	Estimation de la part d'argile A (<0.063 mm). A > 15-20% : matériau mis en décharge.
Ouvrages tirés de la littérature	Grauholz	Analyse granulométrique	Examen visuel du marin. Présence de « balles » d'argile provenant des dépôts glaciaires → matériau mis en décharge.
	Rugen	Pétrographie	Sélection du calcaire
	Giessbach	Pétrographie	Sélection du calcaire
	Chüebalm	Pétrographie	Sélection du calcaire
	Sengg	Pétrographie	Sélection du calcaire
Mappo-Moretina	Analyse granulométrique (seulement essais préliminaires)	Etudes basées sur la perméabilité du matériau mis en place pour rehausser les terrains agricoles	

Figure 7-9 : Principes de sélection

Pour chaque ouvrage considéré, une méthodologie de sélection différente a été mise au point. Ces méthodologies vont d'un simple examen visuel permettant de détecter la présence de matériaux impropres à la réutilisation (Vernayaz) à la mise en place d'un système qualité relativement complexe (Lötschberg). La Figure 7-9 donne un bref aperçu des différentes

méthodes élaborées pour la sélection des matériaux excavés. Ces processus de sélection sont également donnés sous forme d'organigrammes aux figures 7-10 à 7-18.



Figure 7-10 : Méthodologie de sélection, Mt. Terri et Vue-des Alpes - **Figure 7-11 : Méthodologie de sélection, galeries CFF Vernayaz**

Les méthodes de sélection pour les tunnels du Mt. Terri et de la Vue-des-Alpes (Figure 7-10) et pour les galeries hydrauliques de Vernayaz (Figure 7-11) sont similaires. Dans les trois cas, il s'agissait de détecter la présence d'un élément impropre aux utilisations prévues.

Au Mt. Terri, seuls les calcaires étaient sélectionnés pour être transformés en matériaux de remblais, chaille ou graves drainantes, les marnes étant éliminées. La décision de ne choisir que des roches de bonne qualité pour des utilisations peu exigeantes a permis de réduire les risques de production de matériaux inadéquats et de mettre en œuvre des installations de traitements minimales. A la Vue-des-Alpes, le principe de sélection était exactement identique, mais on y a fabriqué en plus des agrégats à béton. A Vernayaz, le but de la sélection était d'éliminer les matériaux contenant visiblement des traces de charbon.

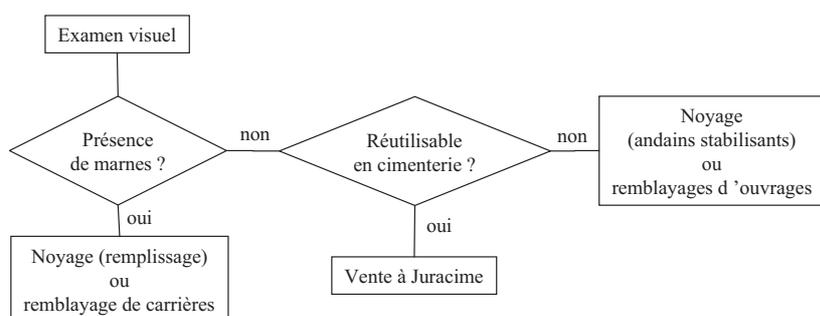


Figure 7-12 : Méthodologie de sélection, Sauges et Gorgier

La gestion des matériaux extraits des tunnels de Sauges et Gorgier (Figure 7-12) est intégrée au concept d'élimination de tous les déblais engendrés par la construction de l'autoroute A5 de Vaumarcus (frontière VD-NE) à Areuse (13.5 km). Les marnes ne sont pas sélectionnées pour la fabrication de ciment pour des raisons techniques et économiques inhérentes à la configuration de l'entreprise fabricant le ciment (le traitement des marnes aurait nécessité de coûteuses installations de transport supplémentaires).

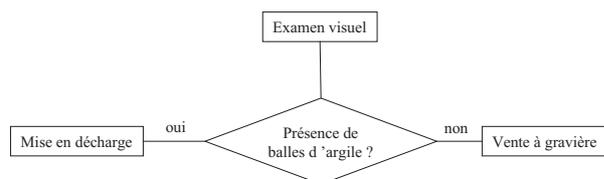


Figure 7-13 : Méthodologie de sélection, Grauholz

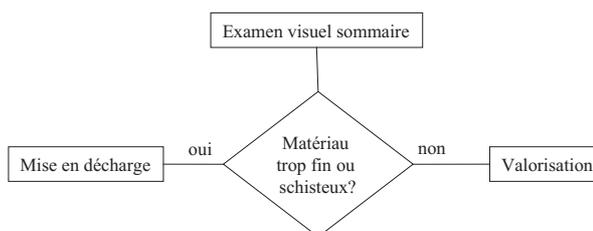


Figure 7-14 : Méthodologie de sélection, tunnels de Plantzette et Gèronde

Le cas du tunnel de Grauholz est assez particulier. En effet, l'excavation était en grande partie réalisée avec un tunnelier à pression de boue. Dans ce cas, il fallait en premier lieu séparer la bentonite utilisée pour la mise en pression de la partie plus grossière du matériau excavé. Les installations de séparation étaient en partie (première étape, séparation des sables et graviers, cf. Figure 7-15) montées sur le tunnelier même, une deuxième étape de traitement se déroulant à l'extérieur du tunnel (séparation des parties les plus fines et récupération partielle de la bentonite). Une fois cette séparation effectuée, le matériau extrait dans les zones d'alluvions fluvio-glaciaires pouvait en partie être traité dans une gravière située à proximité du portail est du tunnel, et transformé en gravier. Le principe de la sélection (Figure 7-13) consistait à éviter que des "balles" d'argile, mêlées aux grains grossiers dans le processus de tamisage, ne puissent polluer les graviers à utiliser dans la construction. La présence de telles balles entraînait la mise en décharge.

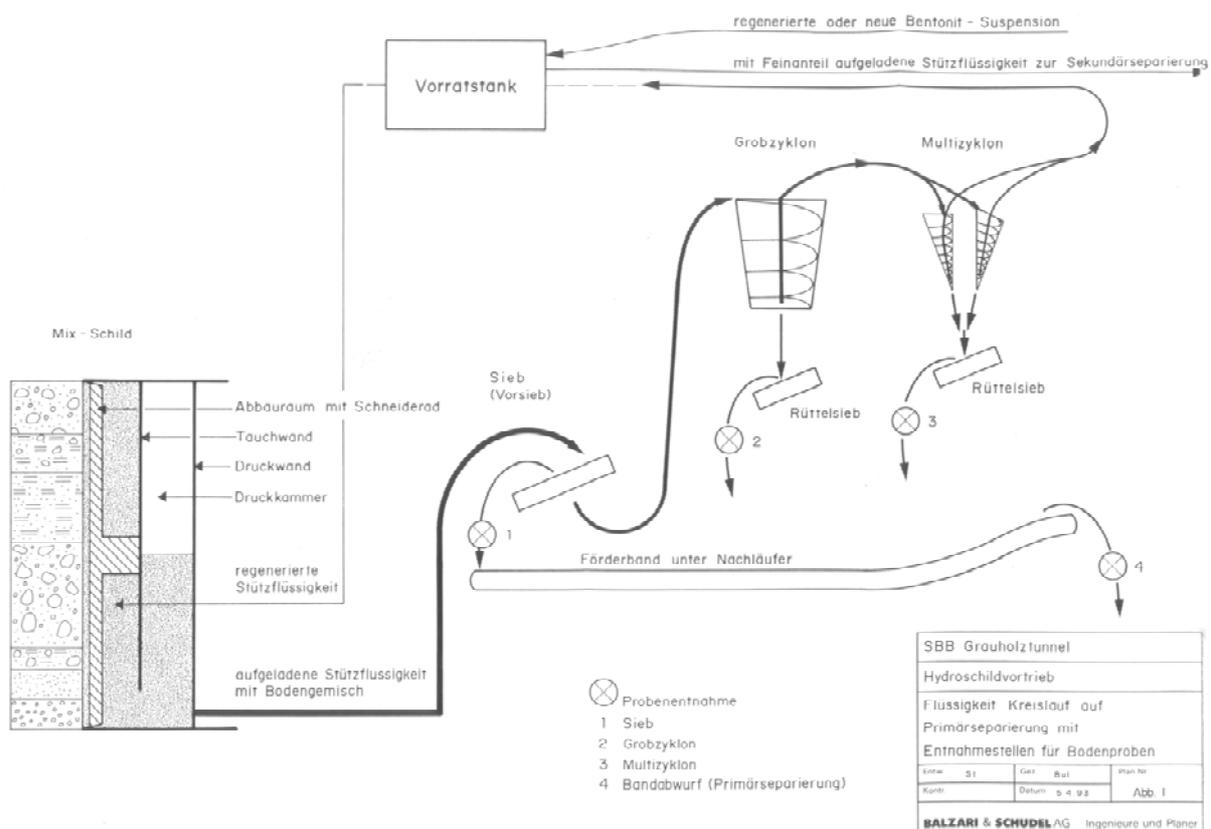


Figure 7-15 : Séparation primaire du matériau excavé au Grauholz, tiré de STEINER, 1993

Les tunnels de Plantzette et de Géronde sont un exemple typique de la problématique de sélection pour l'utilisation des matériaux excavés en terrains meubles. Le but de la sélection (Figure 7-14) est en premier lieu d'éviter que du matériau avec une granulométrie trop fine ne vienne engorger les installations de concassage et de tamisage, et produire un surplus de fines dans les sables, puisqu'il n'y avait pas de séparation intermédiaire entre 0 et 4 mm. En outre, la pétrographie devait également être observée, les matériaux schisteux n'étant pas désirés pour la réutilisation (graves routières). Tant pour la granulométrie que pour la pétrographie, un examen visuel relativement sommaire s'est avéré suffisant.

La sélection des matériaux utilisables en gravière lors de la construction du S-Bahn Zurichois reprenait les mêmes principes, une trop forte teneur en argile (grains inférieurs à 0.063 mm) entraînant la mise en décharge du marin. Là aussi, seule une estimation visuelle servait à sélectionner les matériaux utilisables.

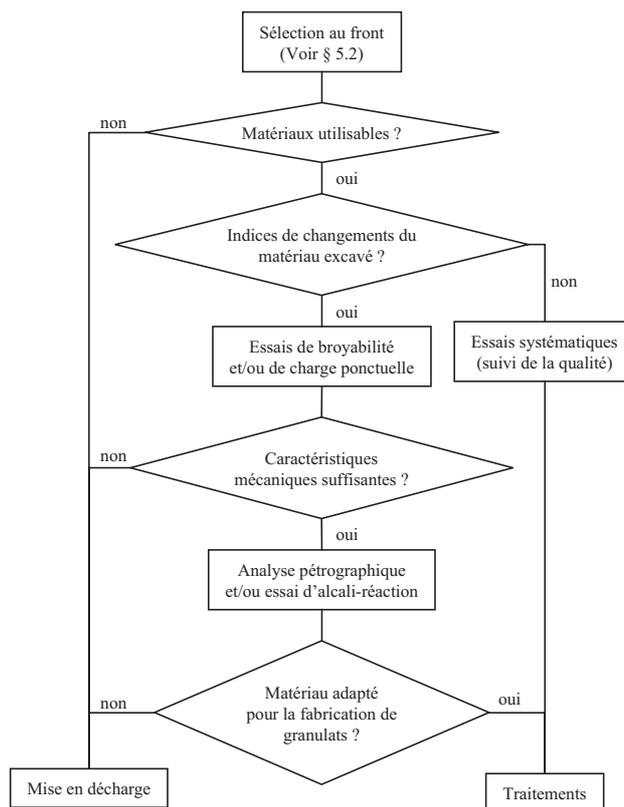


Figure 7-16 : Méthodologie de sélection, Cleuson-Dixence

Figure 7-17 : Méthodologie de sélection proposée pour le Lötschberg [Thalmann, 1996].

On donne ci-dessus et à la page suivante différentes méthodologies de sélection pour une utilisation des matériaux excavés comme agrégats à béton de ciment. Dans les cas de Cleuson-Dixence (Figure 7-16) et du Lötschberg (Figure 7-17), des essais systématiques sur les matériaux excavés pour déterminer leurs caractéristiques mécaniques ont été ou seront réalisés.

La sélection des matériaux excavés lors de la construction des tunnels de Crapteig (Figure 7-18) et de la Vereina (Figure 7-19) s’est basé sur les principes des normes SIA. Il s’agissait de déterminer la teneur en matériaux tendres du marin, une teneur supérieure à la limite fixée entraînant l’exclusion du matériau de la chaîne de fabrication des granulats.

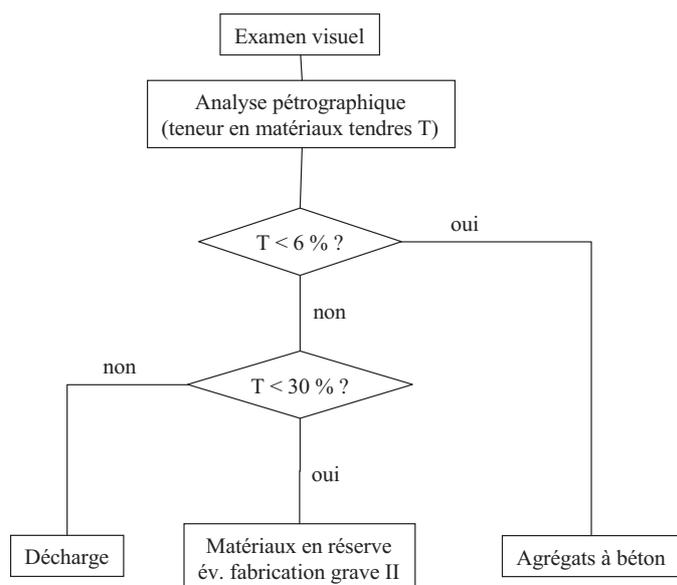


Figure 7-18 : Méthodologie de sélection, Crapteig

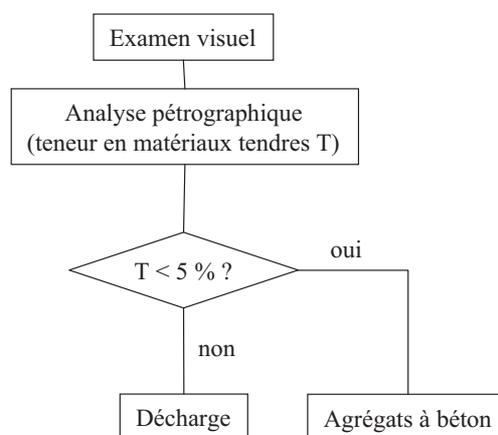


Figure 7-19 : Méthodologie de sélection, Vereina

Les matériaux extraits lors de la réalisation du tunnel de la N13 entre Mappo et Morettina a servi pour la valorisation de terrains agricoles dans les Terreni Carcale au Tessin (rehaussement de la plaine pour lutter contre les inondations) [Prelaz-Droux, 1991]. Pour ces matériaux, des études préliminaires concernant la granulométrie des matériaux excavés au tunnelier ont été réalisées. Pendant les travaux, il n’y a pas eu de processus formel de sélection du marin, tous les matériaux excavés servant à surélever les terrains agricoles.

Ces matériaux, ont également fait l'objet d'essais de compactage à l'EPFL. Cette étude a montré la bonne compactabilité des matériaux extraits de ce tunnel. Les essais effectués ont prouvé qu'il est possible d'utiliser des matériaux extraits au tunnelier non traités pour la construction de remblais présentant une portance élevée, ainsi que comme grave de fondation routière [DESPOND, STEINMANN 1993].

Dans tous les cas, la décision première de la réutilisation ou non des matériaux excavés est prise par un examen visuel du marin, effectué par le personnel de la direction des travaux ou de l'entreprise chargée de l'excavation. Il est indispensable qu'à ce niveau, le personnel soit qualifié et expérimenté.

7.2.7 Méthodologie des traitements

On donne à la Figure 7-20 les étapes possibles de la transformation du marin de tunnel en produits finis utilisables dans la construction.

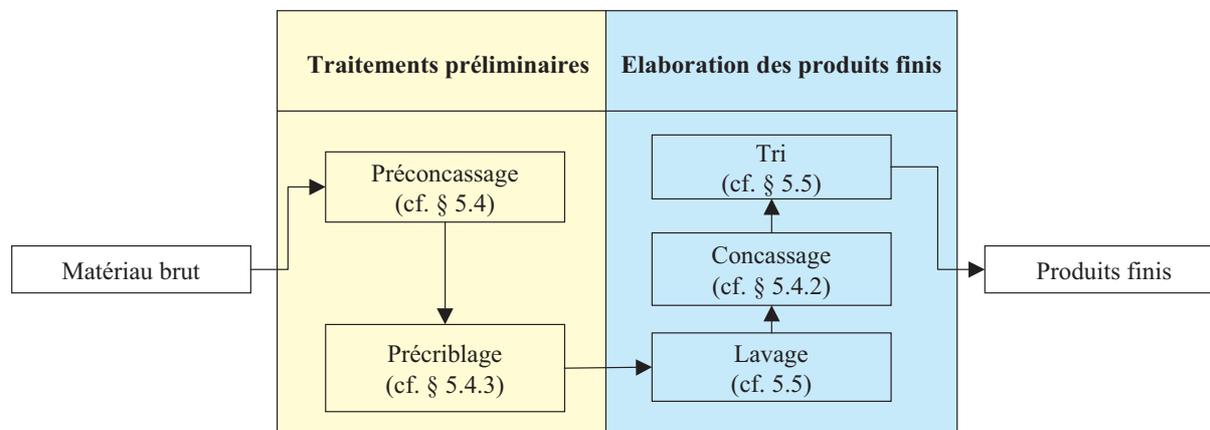


Figure 7-20 : Schéma type de traitements des matériaux d'excavation de tunnels

La fabrication de matériaux de construction à partir de marin de tunnel ne fait pas forcément appel à toutes les étapes décrites ci-dessus. Comme on peut le voir à la Figure 7-21, on ne procède souvent qu'à une seule étape de concassage (pas de préconassage). De même, le lavage, relativement onéreux, n'est mis en œuvre que dans les cas où il est absolument nécessaire (fabrication d'agrégats à béton, parfois de graves).

L'importance du choix des installations de traitement est illustré par l'exemple de la Vue-des-Alpes, où l'absence d'installations de lavage a empêché l'utilisation des fractions granulométriques inférieures à 16 mm comme agrégats à béton en raison, entre autres, de la propreté insuffisante des grains (particules fines agglomérées autour des granulats).

	Tunnels	Préconcassage	Précribleage	Concassage	Lavage
Ouvrages objets de l'enquête	Cleuson-Dixence	-	< 15 mm exclu	Concasseur primaire à percussion Broyeur secondaire à marteaux (axe vertical)	Oui
	Crapteig	Oui	Oui	Concasseur primaire à mâchoires. Concasseur secondaire à percussion.	Oui
	Vernayaz	-	Pas de précribleage, mais extraction des parties fines par lavage	Concasseur mobile à mâchoires	Oui
	Géronde, Plantzette	-	-	Concasseur à percussion	-
	Gorgier, Sauges	-	-	Concasseurs à mâchoires ou à percussion selon entreprises récupératrices	-
	Grauholz	Réduction à 120 mm	Séparation marin - bentonite utilisée pour l'avancement	Effectué par une gravière	Oui
	Lötschberg (sud)	Réduction à 150 mm	< 16 mm exclu	Concasseurs à percussion	Oui
	Mt Terri	-	Oui	Principalement concasseur à mâchoires	-
	Vereina	-	< 16 mm ou > 150 mm exclus	Concasseur à percussion	Oui
	Vernier	-	-	-	-
	Vue-des-Alpes	-	0/60 mm exclu	2 concasseurs à mâchoires	-
	Zürcher S-Bahn	Matériaux vendus en gravière, pas de données sur les installations. Ces dernières étaient cependant aptes à traiter un matériau avec une forte teneur en boues.			
Ouvrages tirés de la littérature	Rugen	Pas de données			
	Giessbach				
	Chüebalm	2 étapes pour atteindre une réduction à 100 mm	< 30 mm exclu	2 concasseurs primaires à mâchoires Concasseur secondaire à marteaux	-
	Sengg			Broyeur à cylindres pour sables	
	Mappo-Moretina	Matériau utilisé tel quel			

Figure 7-21 : Installations de traitements

Le tunnel de Vernier est un cas particulier : les matériaux graveleux étaient mis à disposition d'une gravière locale, et la molasse, généralement réputée comme inutilisable, servait à ériger un remblais routier pour la traversée d'un vallon par l'autoroute. Ce tunnel est intéressant pour cette utilisation. La mise en place de ces matériaux molassiques a conduit à déterminer une procédure permettant de garantir la compacité du remblais. Cette procédure peut être résumée comme suit. Le matériau excavé est acheminé directement dans la zone de remblayage, située à proximité du portail du tunnel. L'entreprise responsable de l'excavation décharge le marin sur des tas intermédiaires, où il est pris en charge par l'entreprise responsable du remblais. Celle-ci met en place les matériaux excavés par couches de 40 cm d'épaisseur foisonnée maximum, et le compactage doit être effectué immédiatement.. Une attention toute particulière doit être observée en cas de temps pluvieux, afin de ne pas transformer le chantier en borbier. On évitera de mettre en place du matériau en cas de précipitations, et le matériau

compacté doit avoir une pente suffisante pour évacuer les eaux de surface, et être lissée (compactage avec engins à pneus) pour éviter leur infiltration. La définition des procédures de remblayage a pu être réalisée au prix de quelques expériences malheureuses (reprise et mise en décharge de matériaux déjà posés), mais en remettant toujours l'ouvrage sur le métier, les matériaux molassiques ont pu être utilisés dans un remblais routier avec succès.

7.2.8 Bilan qualitatif

Qualité des matériaux produits

Toutes les personnes interrogées se sont déclarées satisfaites par leurs expériences d'utilisation des matériaux excavés. Cette satisfaction est toutefois à relativiser. En effet, la qualité des matériaux produits n'était pas irréprochable dans tous les cas, comme le montre la Figure 7-22. En effet, une partie des matériaux dont la qualité était qualifiée de bonne ne répondaient en réalité pas à toutes les exigences des normes en vigueur.

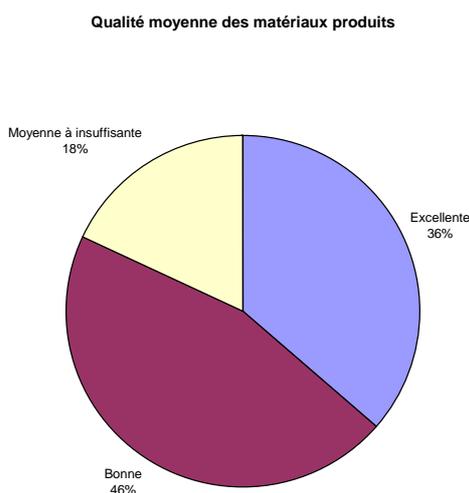


Figure 7-22 : Evaluation de la qualité des matériaux après traitements

On donne à la Figure 7-23 une vue d'ensemble des qualités des matériaux produits en relation avec les types de concasseurs utilisés et la mise en œuvre ou non d'installations de lavage.

Ce tableau montre la nécessité du lavage pour des utilisations « poussées » (agrégats à béton, voire graves selon la géologie). Dans le cas du Mt Terri, le prix des installations nécessaires pour le lavage (lavage et traitement des eaux) a incité le maître d'ouvrage à abandonner la fabrication d'agrégats à béton. Dans ce cas, la fabrication de matériaux de moindre qualité (matériaux de remblais) était économiquement plus intéressante que la production de matériaux à haute valeur ajoutée.

Tunnel	Utilisations	Type(s) de concasseurs(s)	Lavage	Qualité des matériaux produits
Lötschberg	Installations pas opérationnelles à ce jour (mars 2000)			
Vue-des-Alpes	Graves, agrégats à béton	A mâchoires	Non	Moyenne à insuffisante (fines agglomérées aux granulats)
Vereina	Agrégats à béton	A percussion	Oui	Excellente
Cleuson-Dixence	Agrégats à béton	A percussion, secondaire vertical	Oui	Excellente
Plantzette	Graves	A percussion	Non	Bonne (teneur en fines limite)
Géronde	Graves	A percussion	Non	Bonne (teneur en fines limite)
Vernayaz	Agrégats à béton de remplissage, routes forestières	A mâchoires	Oui	Bonne
Sauges	Remblais, noyage	A mâchoires et à percussion	Non	Moyenne à insuffisante
Gorgier	Remblais, noyage	A mâchoires et à percussion	Non	Moyenne à insuffisante
Mt Terri	Remblais, fondations routières	A mâchoires	Non	Excellente à bonne
Crapteig	Agrégats à béton, graves	A percussion	Oui	Bonne
Vernier	Remblais, vente à gravières	?	Oui	Bonne
Grauholz	Vente à gravières	?	Oui	Bonne
Zürcher S-Bahn	Vente à gravières	?	Oui	Bonne

Figure 7-23 : Types d'installations et qualité des matériaux produits

Compatibilité environnementale

La Figure 7-24, montre l'appréciation des interlocuteurs des impacts sur l'environnement que peut avoir l'utilisation des matériaux d'excavation de tunnels, par rapport à une solution « tout en décharge ». Pendant les travaux, les installations de traitement peuvent produire des nuisances jugées plus importantes que celles engendrées par la mise en décharge des matériaux. Afin de lutter contre ces impacts négatifs, on peut mettre en œuvre un certain nombre de moyens protecteurs : parois anti-bruit, arrosage du matériau pour lutter contre les émissions de poussières, isolation phonique des installations de concassage et de tri, choix des systèmes de transport des matériaux (bandes transporteuses par exemple), etc.

En revanche, le bilan global de la compatibilité environnementale est très nettement jugé comme favorable. En effet, les ressources naturelles en matériaux sont ménagées et les mises en décharges réduites.

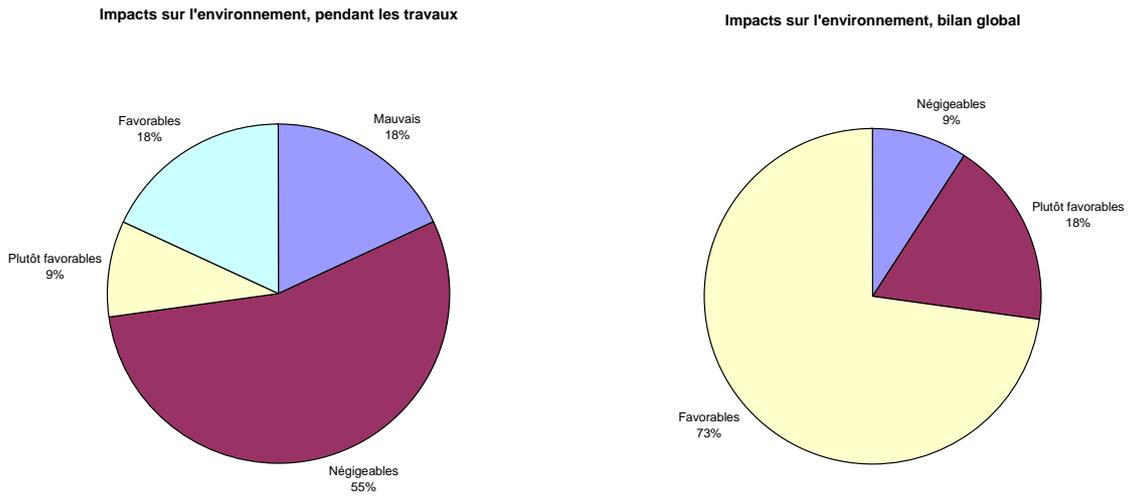


Figure 7-24 : Impacts sur l'environnement par rapport à une solution "tout en décharge"

7.2.9 Commentaires généraux

PRINCIPAUX PROBLEMES RENCONTRES

Un certain nombre de problèmes et difficultés spécifiques à la réutilisation ont été soulevés par les différents interlocuteurs lors de l'enquête. On donne au tableau suivant (Figure 7-25) les principaux problèmes rencontrés en fonction des types d'utilisation.

Types d'utilisation	Problèmes rencontrés
En général	<ul style="list-style-type: none"> • Manque de littérature • Comportement rhéologique de matériaux sortant des fuseaux prescrits par les normes • Variabilité de la qualité du matériau excavé • Difficultés dues au climat (service hivernal) • Rapidité de réaction en cas de modifications de la pétrographie • Manque de prise en compte de la réutilisation dans les études géologiques préliminaires • Tri à la source des matériaux excavés sans entraver l'avancement • Gestion des stocks, souvent compliquée en raison du manque d'espace disponible
Fabrication de granulats à béton	<ul style="list-style-type: none"> • Normes insuffisantes (adaptations indispensables pour le cas des matériaux excavés) • Fiabilité de la centrale à béton lors de la fabrication de béton « auto-plaçant » • Installations sans lavage : trop de fines restent agglutinées aux grains plus grossiers
Fabrication de graves	<ul style="list-style-type: none"> • Installations sans lavage : trop de fines restent agglutinées aux grains plus grossiers pour respecter la teneur limite imposée pour la grave I
Noyage	<ul style="list-style-type: none"> • Mise au point des techniques de noyage permettant une mise en place précise (limitation des dispersions)
Fabrication de ciment	<ul style="list-style-type: none"> • Matériau excavé mécaniquement : présence de particules métalliques dans les matériaux (usure des outils) • Adaptation des usines à la livraison de matériaux « étrangers » (mise en place de nouvelles infrastructures de déchargement et de transport par exemple)
Chaussées forestières	<ul style="list-style-type: none"> • Pas de difficultés particulières

Figure 7-25 : Difficultés liées à la transformation des matériaux excavés

COORDINATION DES TACHES DES DIFFERENTS INTERVENANTS

Le problème de la coordination des tâches des différentes entreprises travaillant sur un projet de tunnel avec récupération et la responsabilisation de chacun des intervenants a été mentionné par la majorité des personnes interrogées. La Figure 7-26 montre les différentes organisations mises en place.

Tâches des différents intervenants

D = Décision R = Responsabilité E = Exécution

	Lötschberg			Vue-des-Alpes			Cleuson-Dixence			Vernayaz			Plantazette + Gêronde			Sauges + Gorgier			Crapteig			Grauholz		
	D	R	E	D	R	E	D	R	E	D	R	E	D	R	E	D	R	E	D	R	E	D	R	E
1. Avancement	ET	ET	ET	MO/DT	MO	ET	DT	DT	ET	DT	DT/ET	ET	MO/DT	ET	ET	ET	ET	ET	ET/DT	ET	ET	ET	ET	ET
2. Préconçassage	DT	DT	ET	?	?	EM	DT	ET	ET							ET	ET	ET	EM	EM	EM	ET	ET	ET
3. Sélection des matériaux utilisables	DT	DT	ET	MO/DT	MO	EM	DT	DT	EM	DT/ET	ET	ET	MO/DT	ET	ET	MO/DT	DT	ET	EM/DT	EM	EM	EM	EM	EM
4. Choix de la destination et transport	EM	DT	EM	MO/DT	MO	EM	MO	DT	EM	DT/ET	ET	ET	MO	ET	ET	MO/DT	DT	ET	EM	EM	EM	EM	EM	EM
5. Traitements	EM	EM	EM	?	EM	EM	DT	EM	EM	DT/ET	ET	ET	MO/DT	EM	EM	DT	DT	ET	EM	EM	EM	EM	EM	EM
6. Livraison des matériaux produits	EM	EM	EM	MO/DT	MO	EU	MO	EM	EM	DT/ET	ET	ET	MO/DT	EU	EU	DT	ET	ET	EM	EM	EM	EM	EM	EM
7. Mise en place	EU	EU	EU	MO/DT	MO	EU	EU	EU	EU	ET	ET	ET	DT	EU	EU	DT	ET	ET/EU	DT	DT	ET	EM	EM	EM

ET Entreprises lots tunnels
 EM Entreprises gestion matériaux
 EU Entreprises utilisation si utilisation ailleurs que dans l'ouvrage
 DT Direction des travaux (générale ou locale)
 MO Maître d'ouvrage

Figure 7-26 : Tâches des différents intervenants

COMMENTAIRES GENERAUX

On livre ici, sans les commenter, quelques réflexions des différents interlocuteurs rencontrés lors de l'enquête.

- « Un examen visuel seul est insuffisant pour la sélection des matériaux. »
- « La réutilisation doit faire l'objet d'un projet développé. »
- « Si l'on s'attend à excaver des matériaux de qualité médiocre, il est important d'axer les études géologiques également sur la réutilisation. »
- « Le contrôle de la qualité dans un projet de réutilisation est très important, et demande un engagement important de tous les intervenants. »
- « Les géologues ou les géotechniciens devraient être plus fortement impliqués dans les projets de réutilisation. »
- « Le criblage des matériaux est nécessaire quelque soit la réutilisation envisagée (problèmes de gélivité dans le cas de constructions de routes par exemple). »
- « Des essais préliminaires à l'échelle 1:1 sont indispensables dans un projet de réutilisation. »

7.3 Conclusion

L'utilisation de matériaux excavés lors de la construction de tunnels a fait l'objet, en Suisse comme à l'étranger, d'expériences généralement positives tant du point de vue économique qu'écologique.

La majorité des professionnels travaillant dans ce domaine s'accorde à relever le manque de littérature et de normalisation (ou d'adaptations de la normalisation existante) en la matière. Différentes études montrent en effet que le développement actuel des normes ne suffit pas pour apprécier et mettre à profit les bonnes performances de matériaux granulaires, et en particulier pour ce qui concerne le comportement au compactage des matériaux concassés [CAPREZ, 1995].

Les expériences analysées montrent que les carences les plus marquées dans le domaine de l'utilisation des matériaux d'excavation de tunnels sont d'une part liées aux études géologiques préliminaires, qui ne tiennent pas assez compte de la réutilisation possible des matériaux rencontrés, et d'autre part à la définition d'une méthodologie pour la sélection des matériaux aptes à une valorisation (détermination des essais les plus adaptés en fonction des réutilisations prévues par exemple).

Bibliographie

CAPREZ, M. (1995): Anforderungen an Verdichtung und Kiessand - *Publication de la Société Suisse de Mécanique des Sols et des Roches*, 131, 13-16

DESPOND, J.-M., STEINMANN, G. (1993): *Compactage de déchets rocheux de tunnels* - Mandat de recherche OFROU No 60/91

PRELAZ-DROUX, R., MUSY, A. (1991): Revalorisation des matériaux d'excavation de tunnel : le cas du rehaussement des Terreni Carcale, au Tessin. - *Publication de la Société Suisse de Mécanique des Sols et des Roches*, 124, 19-24

STEINER, W. (1993): Grauholztunnel, Hydroschild-Vortrieb, Erfahrungen mit der Separieranlage zur Trennung des Bodens aus der Stütz- und Förderflüssigkeit – SBB – rapport interne

8. Synthèse et bases pour l'élaboration d'une méthodologie

8.1 Les étapes de la transformation des matériaux excavés en matériaux de construction

La Figure 8-1 présente les différentes étapes de la transformation des matériaux excavés en produits finis, de l'avant-projet à l'utilisation. Ces étapes pourraient former la table des matières du guide méthodologique que nous nous proposons d'élaborer dans une phase ultérieure de nos études.

La présente étude nous a confirmé que l'établissement d'un tel guide est possible quoique loin d'être aisé. L'utilisation du marin de tunnel touche en effet à de nombreux domaines. Pour la rédaction d'un guide pratique, l'association de spécialistes des branches concernées (géologie, fabrication de granulats, génie civil, matériaux) est nécessaire.

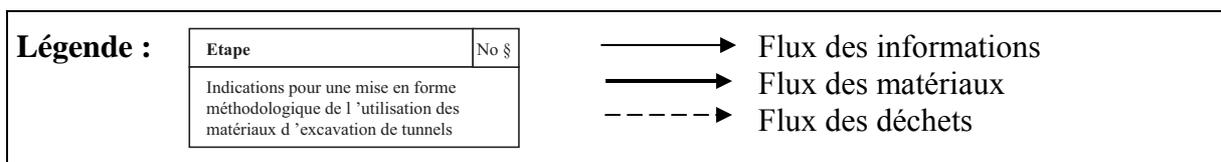


Figure 8-1 : Etapes de l'utilisation des matériaux d'excavation de tunnels

8.2 Géologie et géomécanique

8.2.1 Synthèse

L'élément fondamental de la faisabilité d'une utilisation des matériaux d'excavation de tunnels est le contexte géologique dans lequel s'inscrira l'ouvrage. Nous donnons au chapitre 3 du présent rapport quelques éléments d'aide à l'étude de la faisabilité de l'utilisation des principales formations géologiques helvétiques. La pétrographie est abordée en premier lieu, en donnant les limites d'utilisation des principaux minéraux constituant le sous-sol de la Suisse (§ 3.2). Les particularités régionales sont ensuite étudiées, en commençant par les massifs rocheux (§ 3.3). Pour le Jura, nous proposons une classification génétique liée aux principales caractéristiques mécaniques des matériaux rencontrés. Cet essai de caractérisation montre qu'il serait possible, dans le cadre de l'établissement d'un guide méthodologique, d'étendre cette classification au reste de la Suisse (Plateau, Préalpes, Alpes). Pour des raisons de crédits et surtout de délais, cette extension n'a pas pu être réalisée dans le cadre de la présente étude.

8.2.2 Propositions pour l'établissement d'un guide méthodologique

Les études géologiques préliminaires devraient permettre de prévoir les réutilisations possibles des matériaux excavés ainsi que les quantités correspondantes. Un guide méthodologique de l'utilisation du marin devrait définir quels sont les paramètres à étudier dans l'optique d'une utilisation des déblais, en fonction des matériaux à produire. Ces paramètres sont à définir dans les domaines suivants, par exemple en reprenant la classification géologique proposée au chapitre 3 :

- Pétrographie : mise en évidence des matériaux impropres à une réutilisation en raison de leur composition minéralogique et de leur altération (matériaux tendres, schistes, minéraux pouvant altérer le produit fini, etc.)
- Propriétés mécaniques : caractéristiques mécaniques importantes (résistance, aptitude au concassage, abrasivité, etc.)
- Granulométrie : principalement pour les tunnels en terrains meubles
- Répartition géographique : distribution des différentes classes de matériaux le long de l'ouvrage, quantités correspondantes, importance des zones de transition entre classes, répartition des matériaux dans une même section de tunnel (problèmes de tri).

Au stade de l'avant-projet, la rédaction d'un catalogue des formations géologiques rencontrées en Suisse avec leurs caractéristiques mécaniques, sur l'exemple de la classification proposée pour le Jura et le plateau au chapitre 3, pourrait déjà permettre une première approximation de la faisabilité d'une valorisation des matériaux excavés. La rédaction d'un tel catalogue exigerait un travail important d'exploitation des données de sondages existants en Suisse. Le laboratoire de mécanique des roches de l'EPFL possède déjà une grande quantité d'informations recensées dans une base de données facilement exploitable (cf. chapitre 3). Ces données proviennent cependant de sondages localisés presque exclusivement en Suisse romande. L'extension du territoire de recherche ne pourra passer que par une collaboration avec d'autres organismes helvétiques.

8.3 Méthodes de sélection des matériaux excavés

8.3.1 Synthèse

Une méthode de sélection adéquate du marin est indispensable pour produire un matériau répondant aux exigences de l'utilisation prévue. Les critères à prendre en compte pour cette sélection d'une part le matériau à fabriquer, et d'autre part les caractéristiques du matériau excavé, soit la pétrographie, la répartition granulométrique du marin et les caractéristiques mécaniques des matériaux.

Comme on l'a vu au paragraphe 7.2.6, ce problème de la sélection des matériaux aptes à l'une ou l'autre des utilisations prévues est actuellement traité de cas en cas, et fait appel à des mises en formes méthodologiques fort diverses.

La méthodologie de sélection pour une utilisation de matériaux excavés au tunnelier comme granulats à béton et les essais associés ont été définis dans THALMANN, 1996, et sont actuellement mis à l'épreuve dans le cadre de la construction des NLFA. L'organigramme de sélection des matériaux excavés lors de la construction des NLFA (Figure 8-2) résume cette méthodologie.

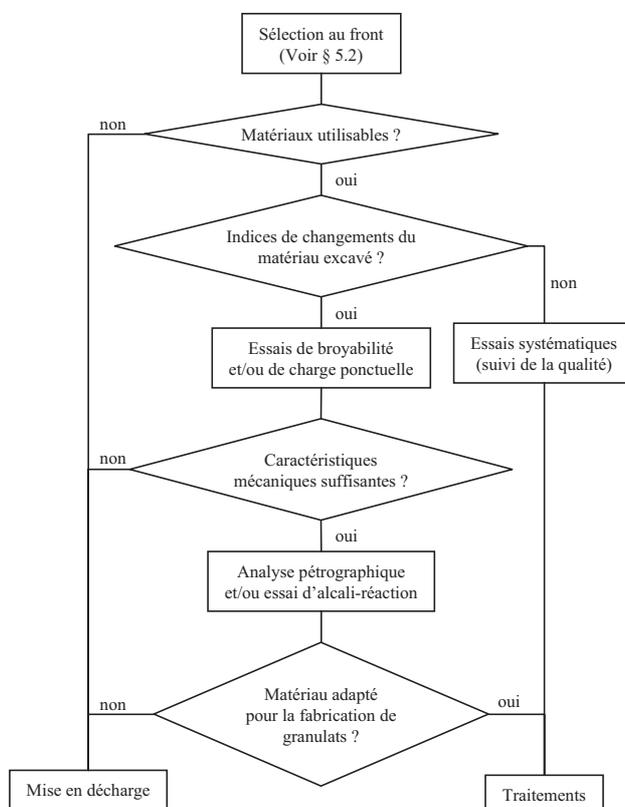


Figure 8-2 : Méthodologie de la sélection des matériaux (NLFA)

8.3.2 Propositions pour l'établissement d'un guide méthodologique

Selon la destination des matériaux excavés, il doit être possible de définir quels sont les essais les mieux adaptés, en fonction de leur précision, de leur reproductibilité, du temps nécessaire à leur réalisation et de leur coût. La mise en forme méthodologique de la sélection des matériaux doit définir l'ordre de réalisation des essais, leur fréquence minimale, et les exigences à observer sur les matériaux bruts pour garantir les exigences sur les produits finis. On donne au tableau suivant les différentes étapes de la sélection, les moyens d'auscultation à disposition, et les choix que doit permettre l'élaboration d'un guide de l'utilisation des matériaux excavés.

Etape de sélection	Moyens d'auscultation	Sources de données	Contenu du guide	Remarques
Confirmation des prévisions géologiques	Données fournies pendant l'avancement	Paramètres de sondages Paramètres des tunneliers Essais au scléromètre		
Sélection primaire	Examen pétrographique	Examen visuel Examen microscopique Tests chimiques	Précision de l'examen pétrographique en fonction des utilisations possibles et de la géologie, fréquence minimale.	Une sélection primaire est suffisante pour une utilisation en remblais, comme matériaux de fondations, de remplissage ou de remblayage contre ouvrage.
Sélection poussée	Propriétés mécaniques des matériaux excavés	Essai Los Angeles Essai d'écrasement ponctuel Essai de broyabilité Essai d'abrasivité	Choix des essais les mieux adaptés aux conditions de chantiers, fréquence minimale Exigences en fonction des utilisations prévues	Une sélection poussée est nécessaire pour la fabrication de granulats à béton de ciment ou à béton bitumineux.

Figure 8-3 : Sélection des matériaux excavés

La sélection mise au point pour les NLFA pourrait servir de base à la mise au point de méthodologies de sélection pour les autres utilisations possibles.

8.4 Méthodes et installations de traitements

8.4.1 Synthèse

La manutention et la transformation des matériaux excavés de tunnels requiert des installations de chantier particulières pour les opérations de transport et de dépôt (§ 5.3), de concassage le cas échéant (§ 5.4), de criblage et de lavage (§ 5.5), et de traitement des boues (§ 5.6).

On donne au chapitre 5 une aperçu de différents types d'installations disponibles sur le marché, leurs limites d'utilisation et quelques critères de choix. Le problème de l'utilisation des boues est également abordé. Enfin, on a représenté au § 5.7 deux schémas de fonctionnement d'installations de fabrication de graves et de granulats à béton (tunnels de la A9 pour la traversée de Sierre et tunnels de la N8 entre Interlaken et Brienzwiler).

8.4.2 Propositions pour l'établissement d'un guide méthodologique

Si les matériaux excavés sont correctement sélectionnés, le choix des installations de traitements dépend essentiellement des caractéristiques exigées sur les produits finis. La Figure 8-4 ci-après résume les types d'installations adaptées aux utilisations dans le domaine routier.

L'élaboration d'un guide méthodologique devrait s'appuyer sur des essais de fabrication à grande échelle sur des installations types, afin de confirmer et de préciser l'adéquation des propositions d'installations données à la Figure 8-4.

Utilisations	Exigences de forme	Granulométrie	Installations adéquates
Remblais	Pas d'exigences particulières	Eviter une trop forte proportion de fines, et de trop gros blocs	<ul style="list-style-type: none"> - Lavage : pas nécessaire - Concassage : tous types de concasseurs utilisables. - Tamisage : peut être nécessaire en fonction de la granulométrie du matériau excavés (élimination des fines et des gros blocs)
Graves	Limitation du nombre de grains non sphériques ou non cubiques pour la grave I (cf. § 6.3.3)	Fuseaux selon norme VSS 670 120	<ul style="list-style-type: none"> - Lavage : nécessaire si teneur en fines du marin trop élevée - Concassage : dans le cas d'excavations au tunnelier, l'utilisation d'un concasseur à mâchoires peut produire un excédent de grains non cubiques - Tamisage : séparations granulométriques 0/4, 4/8, 8/16, 16/32.
Granulats à bétons bitumineux	Exigences selon norme VSS 670 130 (cf. § 6.3.4). Teneur en grains non cubiques ou sphériques limitée, exigences concernant l'angularité.	Courbes granulométriques selon norme VSS 670 130	<ul style="list-style-type: none"> - Lavage : indispensable - Concassage : concasseurs à mâchoires ou à marteaux conseillés. Les concasseurs giratoires émoussent trop les arêtes. - Tamisage : classes granulométriques 3/6, 6/11, 11/16, 16/22, 22/32
Granulats à bétons de ciment	Exigences selon norme SIA 162. Teneur en grains non cubiques ou sphériques limitée.	Courbes granulométriques selon norme SIA 162.	<ul style="list-style-type: none"> - Lavage : indispensable pour du béton de structure, pas forcément nécessaire pour du béton de remplissage. - Concassage : concasseurs à marteaux ou verticaux conseillés. Concasseurs à mâchoires indiqués pour un préconcassage. - Tamisage : classes granulométriques 0/d, d/4, 4/8, 8/16, 16/d_{max}. Séparation pour d = env. 1 mm, afin de composer une courbe du sable optimale.

Figure 8-4 : Choix des installations de taitements

8.5 Méthodes d'évaluation des produits finis

8.5.1 Synthèse

L'évaluation des produits finis se base sur les normes en vigueur. Les critères et exigences normalisés pour les matériaux utilisés dans la construction routière sont résumés au chapitre 6 du présent rapport. On y trouvera tout d'abord les éléments de caractérisation des granulats ainsi que les essais permettant d'évaluer la pétrographie, la granulométrie, la forme, la propreté, l'angularité et la dureté des produits finis (§ 6.2). On résume ensuite les exigences requises dans la normalisation suisse actuelle pour des utilisations en remblais (§ 6.3.1 et 6.3.2), en couches de fondations routières et ferroviaires (§ 6.3.3), dans les bétons bitumineux (§ 6.3.4), et enfin dans les bétons de ciment (§ 6.3.5).

8.5.2 Propositions pour l'établissement d'un guide méthodologique

Les exigences des normes actuelles ne sont pas forcément adaptées aux matériaux concassés. L'établissement d'un guide méthodologique permettrait de proposer des adaptations des exigences des normes actuelles ciblées pour l'utilisation des matériaux excavés de tunnels.

8.6 Gestion des déchets

8.6.1 Synthèse

La gestion des déchets de fabrication, plus particulièrement des boues de lavage des granulats, est abordée au § 5.6. La séparation des particules solides et de l'eau de lavage s'effectue en deux étapes, une première faisant appel à la sédimentation (avec floculation), la deuxième à un pressage ou une centrifugation des boues. L'eau extraite au cours du séchage peut être réinjectée pour le lavage des granulats.

Une solution semble-t-il prometteuse de valorisation des boues de lavage est l'utilisation comme amaigrissant dans la fabrication de briques.

8.6.2 Propositions pour l'établissement d'un guide méthodologique

Pour que les matériaux valorisés gardent leurs propriétés, les opérations de transport et de dépôts intermédiaires doivent cependant être adaptées. Les parties fines des matériaux excavés de tunnels perdent leur valeur dans le cas d'une utilisation en briqueteries en particulier :

- par la présence de gypse ou de composants carbonatés, surtout si ceux-ci sont plus grands que 500 μm
- en cas de mélange avec des eaux de chantier de composition non connue (une gestion séparée des boues de drainage de tunnel et des boues de lavage est donc conseillée)
- en cas de pollution avec du gravier, du sable contenant des carbonates ou des matériaux similaires lors des opérations de manutention sur les places de dépôts.

Les précautions à prendre dans la gestion des boues et les exigences auxquelles elles doivent répondre pour pouvoir être valorisées pourront être précisées dans le guide méthodologique.

8.7 Conclusion

L'importance accrue de l'écologie et de l'environnement exige une systématisation des processus de sélection des matériaux, de traitements, de logistique et de gestion des déchets. En intégrant toutes les étapes ci-avant, la mise au point d'un guide méthodologique de la réutilisation des matériaux de tunnels est possible voire nécessaire, mais nécessite certains calibrages, et une approche économique qui n'a pas été abordée dans la présente étude.