



FACHSTELLE FÜR FORSTLICHE BAUTECHNIK  
CENTRE POUR LE GÉNIE FORESTIER  
CENTRO PER IL GENIO FORESTALE  
POST SPEZIALISÀ PER TECNICA DA CONSTRUCZIUN FORESTALA

---

Bund, Kantone und Fürstentum Liechtenstein

Bovel  
CH-7304 Maienfeld  
Telefon +41 81 403 33 62  
e-mail walter.kraetli@ibw.ch  
www.fobatec.ch

# Matériaux meubles dans la construction

Document de cours

Savigny VD 01.09.16



Introduction.....	3
Matériaux meubles, une vue d'ensemble .....	4
Formation .....	4
Critères différentiels .....	5
Propriétés de quelques fractions et leur signification pour la construction .....	5
Composition des matériaux meubles en Suisse .....	7
Détermination des aptitudes du matériau sur le terrain .....	12
Possibles utilisations de matériaux meubles dans le génie forestier .....	16
Sol de fondation .....	16
Remblais .....	16
Matériaux meubles comme fondation .....	17
Matériau d'enrobage .....	17
Elements de soutènement (blocs) .....	18
Garnissages et remplissages .....	19
Couches de fermeture ou d'usure .....	19
Drainages .....	20
Etancher .....	21
Exploitation, préparation et amélioration de graves (matériaux primaires), Jacques Grob .....	22
Exploitation .....	22
Préparation et amélioration .....	26
Techniques d'amélioration des matériaux meubles .....	32
Compactage .....	32
Graves non traitées, normées, au départ gravière .....	36
Utilisation de matériaux recyclés en forêt .....	38
Classification des matériaux recyclés .....	38
Utilisations courantes et limitations dans la construction forestière et rurale .....	40
Limite des caractéristiques techniques des matériaux recyclés .....	42
Matériaux meubles selon SN 670 009a et leurs aptitudes géotechniques .....	44
Sources .....	45

## Impressum

Herausgeber:

Fachstelle für forstliche Bautechnik  
Bovel  
CH-7304 Maienfeld  
Telefon +41 81 403 33 62  
e-mail walter.kraettli@ibw.ch  
www.fobatec.ch



Auteurs:

Daniel Figi, Büro für technische Geologie, Sargans  
Jacques Grob, Grob Kies AG, Lichtensteig  
Walter Krättli, Fachstelle forstliche Bautechnik (fobatec), ibW Maienfeld

Traduction: Ph. Raetz, Centre pour le génie forestier, CEFOR Lyss

Parution 2016/09/01



## Introduction

En pratique, toute activité de construction est en relation avec la granulométrie des matériaux. Si ce n'est pas dans l'ouvrage lui-même, c'est dans les terrains qui vont reprendre les forces engendrées par un ouvrage que les propriétés de la granulométrie se manifestent. Les fondations de l'ouvrage transmettant les forces au terrain, les caractéristiques du terrain à bâtir sont tout aussi importantes que la partie visible, hors sol, de l'ouvrage. Les connaissances en matière de fondation résultent de nombreuses expériences dans l'histoire de la construction. Il a ainsi été possible de combiner plusieurs matériaux pour aboutir aux caractéristiques constructives souhaitées. Aujourd'hui, la chimie permet d'obtenir des propriétés de matériaux pratiquement inépuisables et aptes à toutes sortes de techniques de construction.

Autrefois, les matériaux meubles étaient exploités à proximité de l'endroit où l'on construisait. Aujourd'hui, l'organisation industrielle et le développement des transports bon marché ainsi qu'un besoin croissant de normalisation des produits favorisent une exploitation et une préparation centralisée, ce qui a pour effet de rendre visible le caractère limité des ressources : les matériaux meubles naturels ne sont pas renouvelables. C'est pourquoi de nouvelles ressources sont recherchées et d'anciennes réinventées. La production de granulats à partir de roches compactes (carrières) et le recyclage en sont le résultat. L'emploi toujours plus important de la chimie dans la construction rend néanmoins le recyclage plus difficile : malgré tous les avantages qu'apportent les additifs dans la construction, leur présence dans les matériaux minéraux recyclés peut présenter des difficultés pour leur emploi. Les expériences réalisées dans ce domaine ont montré que des efforts de normalisation sont aussi dans ce cas impératifs. C'est à ce prix qu'il est possible d'éliminer les substances nocives du cycle de vie des matériaux que vise l'économie durable.

Ce script vise à remémorer les principes de base, présenter la pratique actuelle dans l'exploitation des matériaux meubles et leur mise en œuvre ainsi que les défis actuels. En raison de l'importance de la granulométrie des matériaux, ce thème est toujours d'actualité, même dans la construction forestière.



# Matériaux meubles, une vue d'ensemble

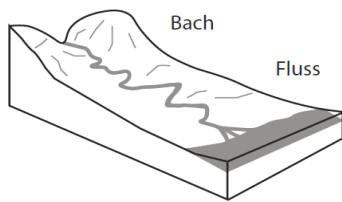
## Formation

Les matériaux meubles résultent principalement de la dégradation et du transport de la roche par les éléments naturels tels que la gravité, l'eau et l'air. Leurs caractéristiques dépendent du mécanisme de transport de leur origine au lieu de dépôt. Si le transport se fait par l'eau on parle alors de dépôts fluviatiles, glaciaux si les dépôts sont formés par les glaciers ou éoliens pour les dépôts formés par le vent (typique : le loess). Si les dépôts résultent de mouvements de masse, on parle alors de dépôts gravitaires.

Le transport des matériaux par l'eau entraîne le fractionnement et le tri des matériaux, de la nature et l'endroit du dépôt résulte la structuration et la compacité des granulats (illustration 1). En règle générale, les matériaux meubles sont constitués d'un mélange de 3 phases : solide, liquide et gazeux. Les granulats (solide) constituent entre eux un espace (pores) qui est rempli d'eau ou d'air.

Outre le transport, les propriétés des matériaux meubles dépendent aussi de l'histoire géologique (surtout la période du quaternaire) de l'endroit de leur dépôt : le compactage dû au recouvrement de glace ou d'autres roches, la cimentation due à la précipitation du calcaire de l'eau ou à une dégradation naturelle des dépôts. Dans la zone urbaine, les matériaux meubles sont souvent le résultat de l'activité humaine : remblais, compactage ou exploitation de matériaux.

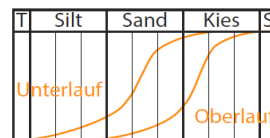
### fluviatil



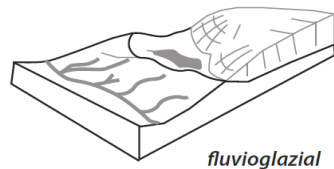
### Beispiele, Eigenschaften

- Bachschutt, Flussschotter
- zunehmende Sortierung
- zunehmende Rundung
- geschichtet

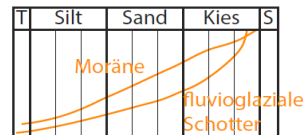
### Charakteristische Sieblinie



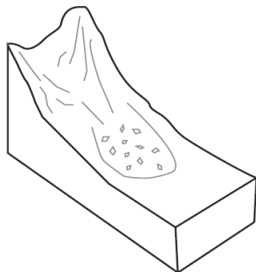
### glazial



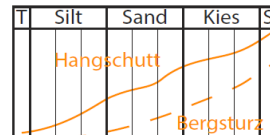
- Moränen
- unsortiert, ungeschichtet
- Fluvioglaziale Ablagerungen
- geschichtet, zunehmende Rundung



### gravitativ



- Bergsturz, Hangschutt
- unsortiert
- ungerundet



### äolisch



- Feinsand, Löss
- sehr gute Sortierung
- Schichtung

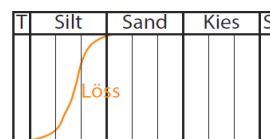


Illustration 1 Types de transport, exemples et propriétés de différents matériaux meubles



## Critères différentiels

La description et la classification des matériaux meubles se fait selon les critères suivants :

### Caractéristiques des sols :

On distingue en premier lieu les granulats grossiers (graviers et sables) des fins (limons et argiles) et en deuxième lieu la répartition des diamètres des granulats dans la courbe : bien gradués (avec toutes ou presque toutes les fractions de diamètre représentée) ou mal gradué (parfois « propre » pour des matériaux dont c'est la qualité recherchée : graviers de drainage par exemple) lorsqu'une fraction est prédominante.

- Dimension des granulats et répartition des fractions La forme des granulats (cassés, arrondis, etc.)
- La plasticité (une mesure du potentiel d'être liant avec l'eau)
- La teneur en matériaux organiques

Et l'état du sol :

- La densité en place, resp. la consistance (état momentané de matériaux meubles fins)

La courbe granulométrique d'un matériau meuble peut être déterminée en laboratoire au moyen de tamisage à sec pour la fraction de sables et de graviers et tamisage humide pour les limons et les argiles. Bien souvent, faute de moyens, il faut recourir aux méthodes de détermination de terrain (voir p 8). La fraction grossière est alors qualifiée visuellement, la fraction fine (argiles, limons et sables fins) par essai de percussion ou par malaxage.

La dénomination des fractions s'opère selon les diamètres limites des granulats selon le tableau 1.

Tableau 1 Dénomination selon les diamètres

Fractions	Dénomination	Dimensions [mm]	Comparaison	
Sols très grossiers	gros blocs	> 630	tête	
	blocs	> 200 à 630		
	pierres	> 63 à 200		
Sols grossiers	Graviers	> 2.0 à 63	œuf de poule	
	gr. grossier	> 20 à 63		
	gr. moyen	> 6.3 à 20		
	gr. fin	> 2.0 à 6.3		
	Sables	> 0.063 à 2.0	petits pois	
	s. grossier	> 0.63 à 2.0	semoule	
	s. moyen	> 0.2 à 0.63		
	s. fins	> 0.063 à 0.2		farine
Sols fins	Limons	0.002 à 0.063	Indifférentiable à l'œil nu	reste collé aux empreintes digitales
	l. grossier	> 0.02 à 0.063		
	l. moyen	> 0.0063 à 0.02		
	l. fins	> 0.002 à 0.0063		
	Argiles	< 0.002		masse brillante

## Propriétés de quelques fractions et leur signification pour la construction

Les propriétés et le comportement technique des matériaux meubles pour les matériaux **non liants** sont déterminés en premier lieu par la dimension des grains.

Les matériaux meubles sont dits **non liants** lorsque le poids de la fraction fine (< 0.06 mm) est de moins de 5%. En plus de la dimension des grains, leur forme ou la rugosité de leur surface joue un rôle pour les propriétés constructives des matériaux meubles non liants. Le matériau est lâche et sa cohésion est faible car celle-ci résulte principalement du frottement des grains entre eux. Les matériaux non liants sont peu sensibles à leur contenu en eau et, par conséquent, au gel.



A partir de 15 à 20 % de fines, le comportement des matériaux meubles devient nettement **liant**, en raison de forces d'attraction entre les grains ; un phénomène que l'on nomme « cohésion ». Les propriétés des matériaux liants sont en relation avec leur teneur en eau, c.-à-d. la consistance (solide, semi-solide, plastique, liquide), de leur teneur en argiles et, enfin, du type d'argile.

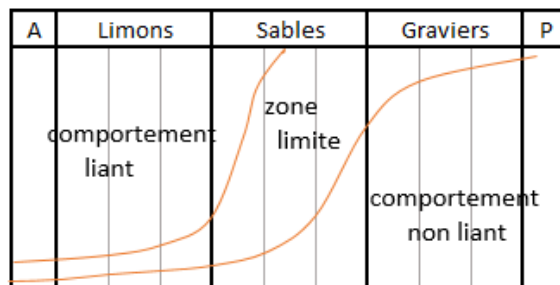


Illustration 2 : zones granulométriques propriétés des matériaux meubles.

Entre les matériaux fins, liants, et les matériaux grossiers, non liants, se trouve une zone que l'on peut qualifier de matériaux mixtes (illustration 2). Ces matériaux, selon leur composition granulométrique, ont un comportement soit liant, soit non liant. Les pierriers ou les moraines sont des exemples de ce type de matériaux meubles.

Les sols organiques forment un groupe de matériaux meubles particulier. Les éléments organiques (feuilles, racines, etc.) peuvent modifier considérablement les propriétés mécaniques de la matrice de base, le plus souvent de manière négative. A partir de 3% d'éléments organiques, les matériaux meubles non liants appartiennent déjà à la catégorie des sols organiques, les matériaux meubles liants à partir de 5%. Les tourbes appartiennent aussi aux sols organiques et sont, en plus, classées selon le degré de dégradation de la matière organique.

Le tableau 2 montre les propriétés des fractions principales des matériaux meubles. Il faut relever que, dans la nature, ils se trouvent rarement dans une composition pure/ « propre ». En règle générale les dépôts naturels sont des mélanges. Une plus-value des exploitants de gravières et sablières consiste précisément à les trier.

Tableau 2 Propriétés et utilisation des fractions des matériaux meubles.

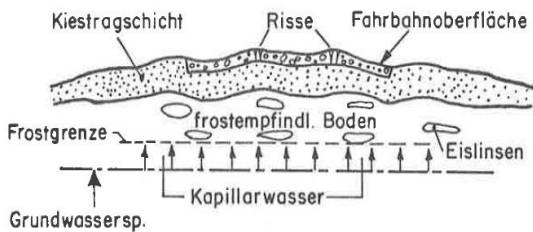
Composante	Propriétés	Emploi	A éviter
Pierres, blocs	Bonne portance, se compacte mal, inhomogène	- Eléments portants, - Drainages	- fonds de fouilles pour conduites - remplissage - couche d'usure
Graviers	Bonne portance, ne se tasse pas, perméabilité, drainant, pulvérulent, compactable si cassés	- Comme couche de fondation, drainage et filtre	
Sable	Perméable, gélif pour les sables fins	- lit pour conduites, carreaux et pavés	- remblais
Limon	Se tasse avec le temps, gélif (voir plus bas)		- matériaux de fondation
Argile	Très hydrophile et se colmate jusqu'à imperméabilité. -sensible à l'eau -se tasse -difficilement compactable	- pour tous travaux d'étanchéification ou de captage d'eau -liant pour les couches d'usure	- Dans les fondations fraction < 0.0063mm ≤ 3.0 % du poids (SN 670 119-NA), -remplissage -remblais



La Norme SN 670 140b donne les règles à appliquer pour la mise hors gel de la couche de fondation des routes. En principe, les matériaux meubles à gros grains peuvent être considérés comme non gélifs car le gel de l'eau contenue dans les pores ne provoque pas de gonflement du corps de la route et de perte de portance lors du dégel. Les matériaux fins, par contre, sont sensibles au gel (gélifs), tout particulièrement les sables fins, les limons et les argiles car il se forme des lentilles de glace qui soulèvent le sol et entraînent une perte de portance lors du dégel. La norme distingue quatre classes de matériaux selon leur résistance au gel et donne des indications sur la profondeur du gel qui dépend de facteurs climatiques. Il faut donc éviter la mise en place de matériaux gélifs au-dessus de la profondeur de pénétration du gel. Les problèmes causés par les matériaux gélifs sont illustrés plus bas :

Pour le Plateau suisse, la profondeur de gel se situe vers 80 à 120 cm. En altitude et dans les montagnes c'est l'expérience qui fait foi, la règle suivante est toutefois conseillée en première approximation : l'altitude au-dessus de la mer divisé par 1000 donne la profondeur en mètre.

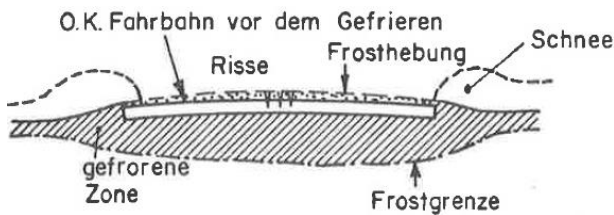
### Problèmes dans les matériaux gélifs :



### Lentilles de gel

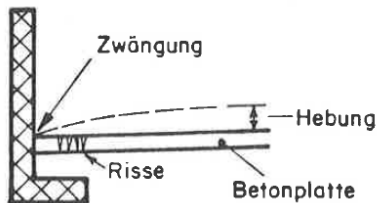
Illustration 3 Des matériaux inhomogènes entraînent la formation de lentilles de glace. Elles favorisent les soulèvements,  
– Formation de fissures (Dietrich K. 1986)

### Ouverture hivernale :



### Soulèvements différentiels

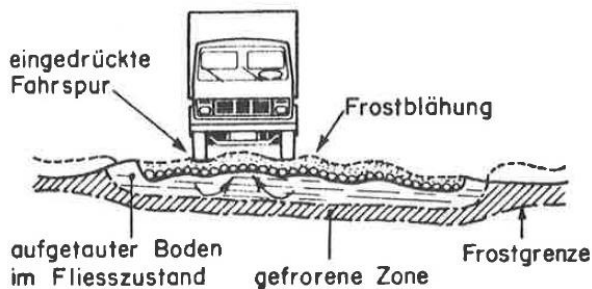
Illustration 4 Le gel pénètre plus sous la route déneigée  
– soulèvements différentiel (Dietrich K. 1986).



### Destruction

Illustration 5 La fondation est hors gel, pas le radier : -destruction des jointures rigides (Dietrich K. 1986).

### Circulation pendant le dégel :



### Compressions

Illustration 6 La teneur en eau élevée causée par la fonte des lentilles entraîne une perte de portance. Quelques passages de véhicules lourds suffisent à la destruction du corps de la route (Dietrich K. 1986).

## Composition des matériaux meubles en Suisse

Le paysage suisse actuel est le fruit de la tectonique (soulèvements, plissements, chevauchements) et de l'érosion par l'eau et la glace. Les matériaux qui recouvrent le plateau, la zone la plus peuplée de Suisse, ont été transportés par les glaciers. Pendant les périodes



interglaciaires, les matériaux déposés par les glaciers ont été repris et déplacés par l'eau, par le vent et par gravitation. En plus du transport, la nature des dépôts sont aussi influencés par leur origine. Le profil et la carte de la Suisse de l'illustration 7 ci-après donne une vue d'ensemble des compositions pétro-lithologiques des matériaux meubles de Suisse.

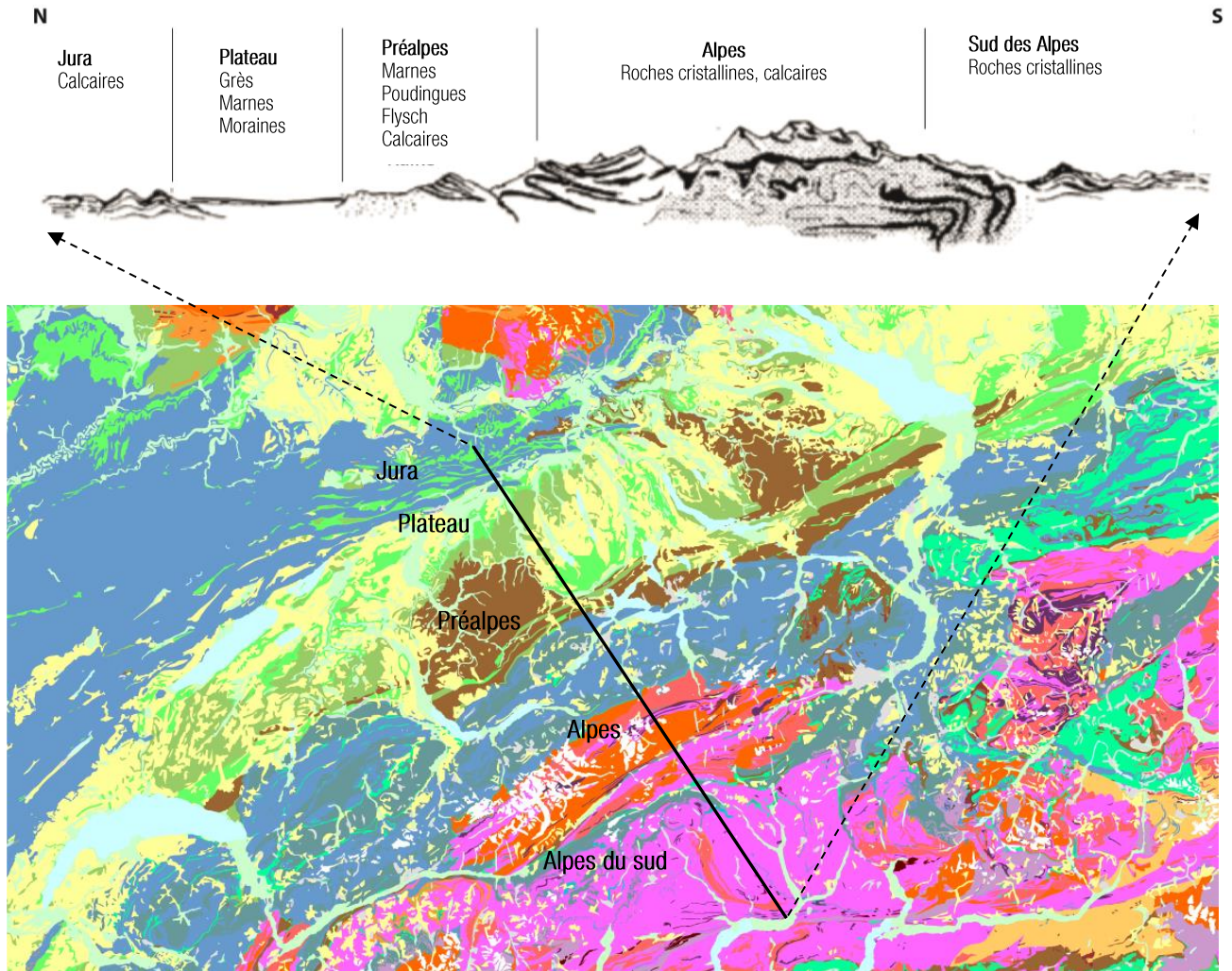


Illustration 6 Carte géotechnique, resp. lithologique et pétrographique de la Suisse. Les roches sont distinguées selon les critères de leur formation, de leur composition minéralogique, de leur granulométrie et de leur cristallinité en 25 groupes. Les régions jaune clair (argiles, limons et sables) et verts clairs (sables, graviers et pierres) dans les zones du plateau et du fond des vallées alpines présente une couverture de matériaux meubles pouvant aller jusqu'à 100 m d'épaisseur. Dans les Préalpes, les conglomérats (poudingues), les brèches et les roches argileuses sont répandues (nuances de brun), le nord des alpes est dominé par les roches calcaires (bleus). Les roches cristallines (granits et roches basiques, roches métamorphiques comme les gneiss, schistes etc.) forment une grande partie des Alpes centrales et du sud (tons de rouge).

Ainsi les moraines du nord des alpes contiennent en majorité des composantes calcaires alors que les moraines des grandes vallées glaciaires sont mélangées. Les pentes et les pierriers ainsi que les dépôts des effondrements des Préalpes sont principalement composés de roches argileuses, marneuses, alors que dans le Jura ces dépôts sont majoritairement de nature calcaire.

A l'exception des dépôts lacustres, qui ont peu d'importance en forêt, le chapitre suivant traite des principales compositions des matériaux meubles rencontrés en Suisse.





## Moraines

Les moraines sont des dépôts glaciaires transportés par les glaciers. On en trouve aussi sur le Plateau ; les glaciers alpins ayant presque complètement recouvert le Plateau il y a 24'000 ans à l'apogée de la dernière période glaciaire (illustration 7).



Illustration 7 Lucerne à la dernière période glaciaire. Le panorama alpin avec le Pilatus et le Rigi. Peinture d'Ernst Hodel (1892-1902).

Typiquement, la composition lithologique des moraines est très diverse du point de vue de la granulométrie. A côté des gros blocs on trouve des pierres, des graviers et sables, des limons et des argiles. La forme des granulats est très diverse aussi : de grains cassés à arrondis. Du point de vue pétrographique on trouve des granits, des gneiss, des calcaires et des grès. Contrairement à d'autres types de dépôts, les moraines sont dépourvues de structure stratifiée.

De manière générale, on distingue les moraines de fond des moraines latérales (ou de marges). **Les moraines de fonds** sont constituées de pierres et graviers polis ou striés pris dans une masse d'argile et de sable fins. Ces matériaux ont été compactés fortement par le glacier et sont, par conséquent, très dense. Les moraines de fonds sont observables dans les entailles des ruisseaux où elles forment des berges très escarpées, ressemblant à de la roche. En raison de leur teneur élevée en matériaux fins, elles sont relativement inintéressantes comme matériaux de construction et de plus, sont sujettes aux glissements lors de fortes saturations en eau.

**Les moraines de marges** (m. latérales, m. centrales issues de la confluence de deux glaciers ou moraines frontales forment des éléments reconnaissables du paysage (illustration 8). Leur granulométrie est plus équilibrée que celle des moraines de fonds. Elles sont aussi moins compactes, et peuvent, parce que leur fraction de fines est faible, être exploitées comme gravière.



Illustration 8 Moraines latérales du glacier Vadret da Tschierva, Engadin, en retrait (gauche) moraine frontale près de Möhlin, Argovie (droite).

## Dépôts fluvio-glaciaires

Les dépôts fluvio-glaciaires se présentent majoritairement comme des formations grossières, des graviers et sables surtout, résultant de l'activité de fonte des glaciers aux confins de ceux-ci. Les dépôts fluvio-glaciaires sont souvent mêlés aux moraines glaciaires à proximité du glacier mais présentent toujours une structure en strates. Plus loin en plaine, les dépôts fluvio-glaciaires sont caractérisés par une fraction de fine encore moindre, une granulométrie assez propre et une forme arrondie des granulats. Ils constituent sur le plateau suisse une source de matériaux de construction très recherchée pour les sables et graviers.



Les Deckenschotter sont d'anciens dépôts fluvio-glaciaires (d'avant la dernière glaciation). En raison de leur âge, les granulats (sables et graviers) sont fortement dégradés et en partie dissous, ce qui entraîne une solidification de la matrice fine. Ces dépôts, exploités par le passé, ne peuvent plus l'être de nos jours parce qu'ils se trouvent en forêts et sont souvent des aquifères [1].



Illustration 9 Dépôts fluvi-glaciaires récents à Berninapass (Lago Bianco).

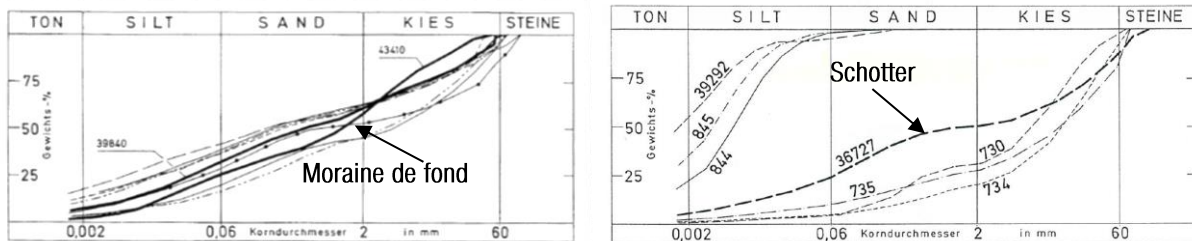


Illustration 10 Courbes granulométriques typiques pour la moraine de fond (gauche) et des graviers fluvi-glaciaires (droite).

### Dépôts de torrents et laves torrentielles

Ces types de dépôts se rencontrent le plus fréquemment dans les Alpes et Préalpes au pied de petits cours d'eau ou de torrents et forment parfois d'importants cônes d'éboulis (illustration 11). La granulométrie de ces matériaux est grossière, les granulats sont peu arrondis, souvent cassés, car ils proviennent d'un bassin versant proche et petit. Il s'agit souvent de sables limoneux, mal gradués, avec une fraction importante de pierres et blocs. Du bois se trouve aussi dans les laves torrentielles.

Ces matériaux peuvent être exploités pour la construction s'ils sont récupérés dans un dépotoir et si la qualité des roches du bassin versant est adéquate.



Illustration 11 Dépôt en cône de l'Ilgraben près de Loèches, vue de face (gauche) et aérienne (droite).

### Dépôts d'éboulements



Suite au retrait des glaciers et la suppression de la pression latérale sur leurs flancs, les vallées alpines ont connu des éboulements importants (Viège, Flims, Klöntal). Des événements plus récents (Goldau 1806, Elm 1881, Randa 1991) montrent que le paysage alpin peut être modifié considérablement. La granulométrie de ces éboulements est très hétérogène. Souvent il s'agit de blocs pouvant atteindre la dimension de petits immeubles pris dans une masse limoneuse et sableuse. Comme il s'agit d'un matériau concassé naturellement, la forme des granulats est cassée, parfois légèrement arrondie. La pétrographie reflète celle de la niche d'arrachement.



Illustration 12 Dépôt de l'éboulement de Flims exploités à Versam (gauche). Eboulement de Randa (droite)

### Eboulis de pente

Les éboulis de pente sont très répandus dans les Alpes et se forment par altération des falaises et rochers en amont. Le transport est de nature gravitaire et se reflète dans la forme cassée des granulats. La granulométrie est propre, centrée sur les graviers, pierres et blocs. Les interstices des pierriers se comblent avec le temps en granulats fins. Dans les régions à pétrographie argileuse (flysch, schistes lustrés), les interstices se remplissent de limons et d'argile, mais peu de sable. De tels dépôts sont peu attractifs pour une exploitation en raison de la présence des granulats fins (argiles et limons). Par contre les ébouilis de pente issus de roches carbonatées (calcaires, dolomies) ou de roches gréseuses ou granitiques peuvent constituer des sources de matériaux intéressantes. Les dépôts gravitaires de roches métamorphisées avec une forte proportion de phyllosilicates (micaschistes, chlorites) sont moins intéressants.



## SN 670 009 : Terminologie géologique des matériaux meubles

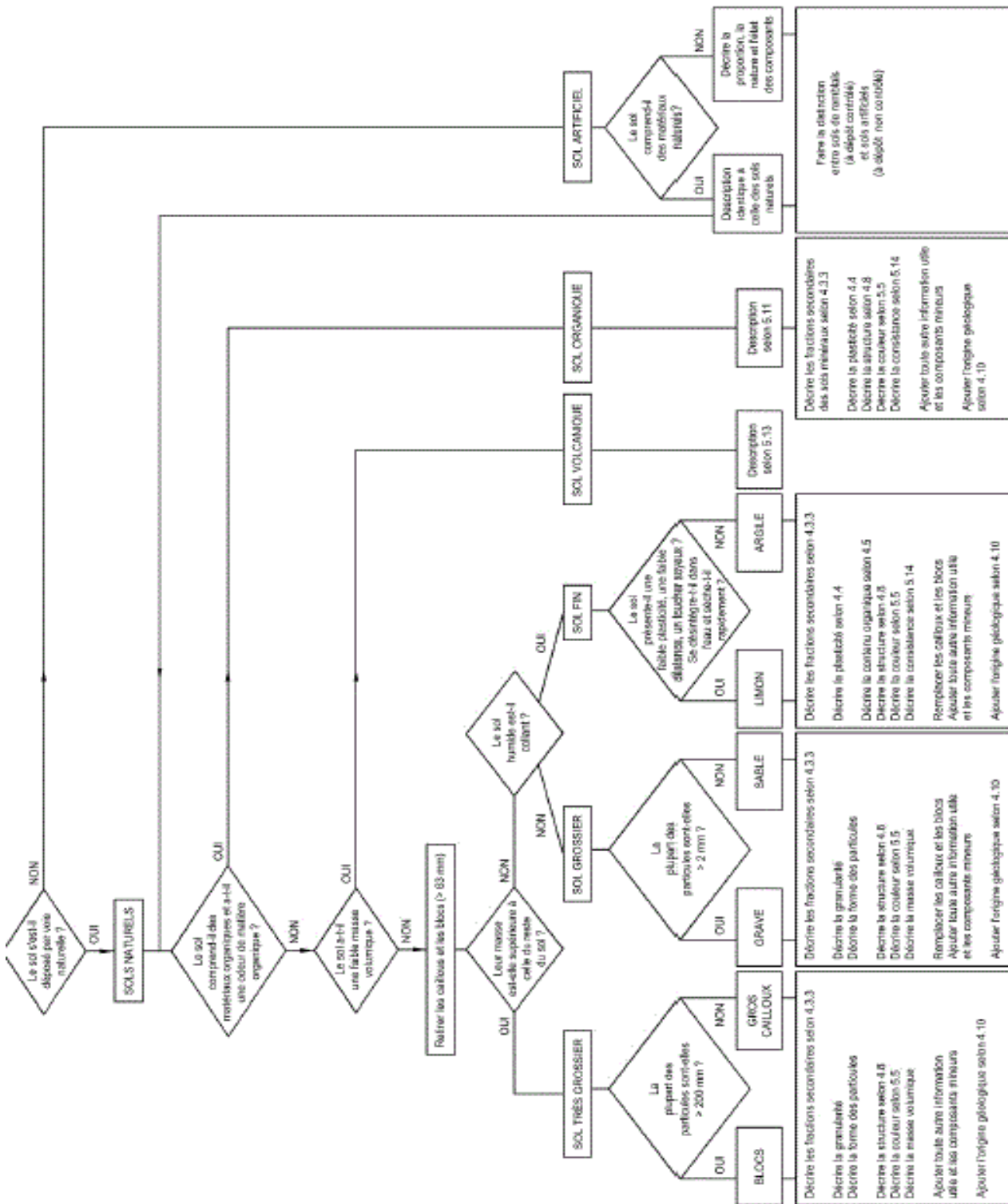
La norme SN 670 009 fixe la terminologie des matériaux meubles. Elle ajoute aux matériaux meubles décrits ci-dessus d'autres types de matériaux. En particulier les colluvion ou limons de pente qui sont des matériaux fins déposés par le ruissellement dans le bas d'un versant, la craie lacustre qui résulte de la précipitation de calcaire et de restes de plancton dans les lacs ou les loess qui sont des dépôts fins amenés par le vent aux abords des grands glaciers tabulaires des périodes de glaciation. Les sols qui recouvrent les matériaux meubles sont eux subdivisés en horizons. L'horizon A est en fait la couche supérieure qui permet la culture, elle contient la matière organique. Lui succède l'horizon B, qui contient encore des traces de matière humiques. La norme SN 640 581 décrit en détail les aptitudes pédologiques des sols et des types d'horizons A et B. L'exploitation des matériaux meubles concerne presque exclusivement l'horizon C.

## Détermination des aptitudes du matériau sur le terrain

La détermination sur le terrain ne fait pas appel aux méthodes de laboratoire, le matériau est qualifié par une inspection visuelle et ses fractions dominantes et annexes estimées. La fraction dominante chez les matériaux grossiers (sables et graviers) est celle qui représente le plus grand pourcentage de masse. Pour les matériaux mixtes (mélanges d'argiles de limons, de sable et de gravier) la même règle est appliquée pour autant que la fraction fine ne dicte la qualité et le comportement du matériau. La fraction annexe est constituée par les éléments le plus faiblement représentés dans le matériau. La nomenclature du matériau se décline ainsi selon le modèle suivant : la fraction principale donne son nom au matériau, les fractions annexes sont ajoutées en adjectif dans l'ordre de leur pourcentage de masse. Celles-ci peuvent encore pondérées. Les fractions très grossières (pierres, blocs) sont ajoutées à la fin.

Exemple : gravier, fortement sablonneux, faiblement limoneux avec peu de pierres (= matériaux meubles avec 0% d'argile, 11% de limon, 32% de sable, 47% de graviers et 10 % de pierres. La détermination de la qualité des matériaux meubles sur le terrain fait l'objet de la norme SN 670 004 – 1b (illustration 13). Des exemples de matériaux meubles sont donnés dans les illustrations 14 et 15.

Illustration 13 Diagramme pour la dénomination et la description des matériaux meubles selon SN 670 004-1b.





Description géotechnique :  
gravier, fortement sablonneux, partiellement faiblement limoneux, avec beaucoup de pierres et quelques blocs jusqu'à  $\varnothing$  0.3 m, polymiktes, éléments anguleux à majoritairement arrondis

Identification : moraine

Utilisation : comme couche portante ou de fondation, pour remblais et remplissages, utilisable comme matériau non liant (après préparation).



Description géotechnique :  
gravier, fortement sablonneux, limoneux, légèrement argileux avec pierres et blocs jusqu'à  $\varnothing$  0.5 m ; composantes anguleuses jusqu'à arrondies, monomiktes (schistes lustrés)

Identification : graviers de torrent

Utilisation :  
comme couche portante ou de fondation, pour remblais et remplissages, utilisable comme matériau non liant (après préparation).

Illustration 14 Exemples de composition de matériaux meubles



Haut du profil :

Description géotechnique :  
Sable fin, fortement limoneux, argileux

Identification : couverture, dépôts d'inondations

Utilisation :  
Comme étanchéifiant lors de travaux de captation de source ou de drainages, comme liant dans une couche d'usure de matériaux meubles non-liants.

Bas du profil :

Description géotechnique :  
Gravier, sablonneux, avec des pierres ( $\emptyset$  max = 0.15 m), légèrement limoneux, composantes polymiktés, arrondis

Identification : graviers du Rhin

Utilisation :  
Comme couche portante ou de fondation, comme remblais ou remplissages



Description géotechnique : limon argileux, légèrement organique

Identification : dépôt en eaux calmes (lacustre)

Utilisation :  
La teneur en éléments peut présenter un problème. Eventuellement comme étanchéifiant lors de travaux de captation de source ou de drainages, comme liant dans une couche d'usure de matériaux meubles non-liants

Illustration 15 Exemple de matériaux meubles



## Possibles utilisations de matériaux meubles dans le génie forestier

### Sol de fondation

Les contraintes résultant d'ouvrages doivent pouvoir être reprises par le sol. Le sol doit être en mesure de les supporter. Si les contraintes dépassent la portance du sol, il en résulte une rupture : au-dessous d'un élément de fondation, il se forme un horizon de glissement. On parle alors d'un dépassement de la portance du sol. Pour rappel, la portance d'un sol dépend de l'**angle de frottement**, de la **cohésion** et de la **densité** du sol.

Selon la norme SN 640 324, il est possible de qualifier les sols en 5 classes de portance (illustration 16). Les contraintes dépendent du poids et de la géométrie de l'ouvrage.

S'il y a rupture, on parle de **problème de portance**. Si seuls des tassements (déformations sans rupture) sont observés, il s'agit d'un problème d'aptitude au service. Pour les constructions forestières il s'agit le plus souvent d'un **problème de portance** que d'une question d'**aptitude au service**. En effet, le trafic étant relativement faible, certaines déformations n'entravent pas de manière significative l'aptitude au service. La norme SIA 267 et 267/1 traite de la portance ultime.

Genre de sol	Classes de portance possibles
Sols cohésifs, gonflants (p. ex. marnes)	Clarification par des études particulières
Sols fins (argiles et limons)	S0...S2
Sols moyennement grossiers (sables)	S2...S3
Sols grossiers (graviers)	S3...S4

Illustration 16 Classes de portance en possibles en fonction du genre de sol selon SN 640 324

### Remblais

Le long du tracé d'un chemin, les points bas sont remblayés pour égaliser le profil en long. Souvent, ce sont les matériaux excavés sur place aux points hauts qui sont utilisés en remblais. On parle alors de transports longitudinaux lors de terrassements de chemin (neufs) ou en cas d'élargissement de chemin existant. Se pose alors la question de la pente maximale à donner aux talus du remblai. Ces pentes de remblais sont à dimensionner pour la portance et le tassement admissible. C'est le profil d'utilisation du remblai qui va déterminer la contrainte et la manière de procéder.

Il faut assurer au remblai une bonne assise avec les terrains en place. Il faut décaper la couche d'humus et souvent réaliser un redan au pied du futur remblai (CAN 211.611). La pente finale du remblai doit correspondre à l'angle de frottement du matériau utilisé pour une densité moyenne. Un angle de 34° ou un fruit de 2:3 s'est révélé une valeur pratique. Avec un compactage plus élevé et une protection contre l'érosion de surface, il est possible d'atteindre une pente stable de 4:5. L'aptitude des matériaux meubles au remblai a été résumée de la manière suivante (Byland 2013) :

- Matériaux aptes : matériaux non liants à faiblement liants (graviers, sables argileux et sables limoneux)
- Éventuellement : limons, limons sableux, limons avec graviers (dépend de la saturation en eau)
- Inaptes : couche humique, sols organiques, présence de bois.

Il est possible d'atteindre des valeurs de portance élevée et des tassements insignifiants en remblayant et compactant par couches successives (voir le chapitre « compactage ») de 30 cm d'épaisseur. (CAN 211.614 : remblayages). L'incorporation d'élément de plus de 300 mm est problématique pour cette raison. Les documents de soumission de travaux y font très fréquemment mention. S'il s'agit de matériaux fins, liants, il n'est pratiquement pas possible de compacter de manière satisfaisante car l'eau ne s'évacue pas. La consolidation des matériaux par évacuation de l'eau peut durer des années, pour autant que la situation hydrostatique soit favorable. Il est possible d'accélérer la consolidation en préchargeant le remblai mais il faut du temps. Une solution consiste à stabiliser les matériaux par un apport de chaux ou de ciment pour adsorber l'eau à la structure des matériaux et, ainsi, les consolider (CAN 211.813).

Lors de remblais, les principes suivants devraient toujours être respectés (Byland 2013) :

- Décaper la couche d'humus (horizon A)
- Ne pas travailler sur un sol gelé ou enneigé
- Terrassement en escalier afin de bien assurer l'assise du remblai
- Planie pour les matériaux de fondation du chemin +/- 4 cm, 4% de dévers aval.





Si la mise en place de remblai n'est qu'une mesure paysagère (sans contrainte de charge), d'une épaisseur raisonnable dans un endroit pas trop pentu, il est possible de renoncer au compactage et de simplement déverser et taluter (CAN 211.621). Le tassement naturel, inévitable, ne devrait pas constituer un problème.

Le document en allemand « Erläuterungen einiger geotechnischer Begriffe und Konzepte » contenant de plus amples informations sur le remblaiement est disponible à l'adresse [www.fobatec.ch](http://www.fobatec.ch). Pour plus d'information concernant le remblaiement, voir le document en allemand « Erläuterungen einiger geotechnischer Begriffe und Konzepte » disponible en ligne sur le site [www.fobatec.ch](http://www.fobatec.ch). Weitere Informationen zu Schüttungen sind im Webdokument ‚Erläuterungen einiger geotechnischer Begriffe und Konzepte‘ auf [www.fobatec.ch](http://www.fobatec.ch) zu finden.

## Matériaux meubles comme fondation

Le rôle d'une fondation- un élément portant de la construction- est de répartir et transmettre les forces exercées par un ouvrage dans le sol sans déformation de ce dernier. Un matériau meuble de la bonne granularité et bien compacté peut remplir cette fonction. Principalement les routes mais aussi les installations de sport et de jeux sont fondées avec de tels matériaux. Les contraintes doivent être supportées durablement. L'aptitude des matériaux est principalement dictée par un mélange de granulats fins et plus grossiers. En plus de la fonction de portance, les fondations des chemins forestiers doivent aussi supporter le gel. L'exposition aux dégâts dus au gel dépendant largement de la sensibilité à l'eau des granulats fins, la fraction des fines (<0.063mm) doit être d'au maximum de 3% de la masse totale pour satisfaire la norme.

Les matériaux selon SN 670 119 NA (voir le chapitre « graves non traitées au départ gravière ») remplissent les exigences élevées de portance et de résistance au gel ; ils doivent, pour des raisons de qualité (et en plus juridiquement) être utilisés pour les chaussées en bétons bitumineux (CAN 221.111). Ils apportent en plus des qualités d'homogénéité et de compactibilité qui facilitent grandement leur mise en œuvre. Les granulats des différentes fractions sont mélangés en fonction des qualités recherchées et la composition est régulièrement contrôlée. On peut les obtenir comme matériaux primaires, naturels, ou comme matériaux secondaires issus de la filière de recyclage. L'emploi des matériaux recyclés est traité dans le chapitre « matériaux recyclés en forêt »

Il est également possible d'utiliser des matériaux « graves non normées » (auparavant tout-venants de gravière) (CAN 221.112). Lors de leur exploitation ils sont souvent tamisés et débarrassés de leurs refus mais parfois aussi utilisés directement. Leurs composantes sont forcément hétérogènes. Leur sensibilité à l'eau et au gel est aussi plus élevée que les graves normées. Ils se laissent moins bien compacter et les parties fines peuvent circuler et, à terme, provoquer des tassements locaux. Pour des chemins forestiers avec couche de finition non liante (béton d'asphalte) et sans circulation hivernale, ces matériaux sont certainement suffisants. Si une circulation hivernale est prévue, il s'agit de vérifier que le matériau soit non-gélif ou de prévoir une fermeture du chemin pendant la période de dégel.

Lors de la mise en place il faut éviter que la manutention des graves conduise à une séparation des fractions ; le mélange doit rester homogène. Il faut veiller en particulier aux points suivants, surtout si les graves sont sèches :

- Minimiser la hauteur de chute
- Adapter les vitesses de transport (les vibrations séparent les fractions)
- Humidifier les graves
- Utiliser des dispositifs de canalisation
- Pas de déversement en tas
- Mise en place au godet, pas de déversement direct (evtl. pose à la finisseuse)

La contamination (par de la terre) des graves doit être évitée. Le trafic de chantier sur une couche insuffisante est dommageable ; la pose d'un géotextile sur la planie peut s'avérer judicieux pour éviter la contamination par un sol en place de mauvaise qualité.

Epaisseur en place : au minimum 2 fois le diamètre maximal des granulats, au maximum 50 cm (si la méthode de compactage est adéquate)

Compactage  $ME \geq 100 \text{ MN/m}^2$  (Classe de trafic T2);  
Planie  $\pm 10 \text{ mm}$

## Matériau d'enrobage

L'enrobage (aussi lit de pose) doit contenir un élément de construction, répartir la pression à la surface de l'élément et empêcher le poinçonnement (généralement de conduites). Il doit en outre être perméable et agir comme filtre par rapport aux couches de matériaux portant aux alentours. Une migration du matériau d'enrobage dans les couches portante ne doit pas être possible. Le matériau d'enrobage doit avoir une granularité beaucoup plus petite que l'élément de construction à enrober afin de répartir la pression et éviter un poinçonnement. Il faut donc choisir un matériau dont la courbe granulométrique est « étroite ». La fraction fine > 0.063 mm ne devrait pas dépasser 5% de la masse. Dans la pratique, c'est rarement le cas, il s'agit de sables ou de graviers fins, dits « propres », c'est-à-dire sans argiles et limons (risques de migration et de colmatage).



Les éléments à enrober sont des conduites, des plaques, des pavés et éléments en béton préfabriqués (regards, aqueducs etc.). En pratique, les matériaux d'enrobage sont des granulats fins 0/2 à 0/8 ou plus gros s'il s'agit d'enrober des éléments massifs de construction.

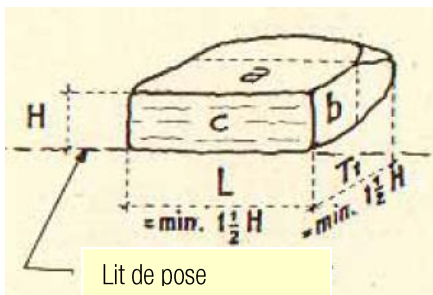


Illustration 17 Enrobage de gaines électriques dans un sable 0/4

## Eléments de soutènement (blocs)

Les blocs transmettent les forces externes au travers de leur structure rigide dans les fondations et le sol. Des pierres et blocs de différentes grandeurs peuvent former, si posés de manière professionnelle, des ouvrages robustes et durables. Leur poids élevé leur confère une grande stabilité pour autant que le sol soit stable et il leur permet de transmettre des forces de poussée importante.

En génie forestier, les pierres et les blocs sont utilisés pour des ouvrages de soutènement, pour les talus de route, pour l'assainissement de glissements, pour la correction de torrents, comme ouvrage paravalanche ou pour des digues contre les chutes de pierres. Leur forme doit être adaptée afin de pouvoir être posées.



### Dimensions

L longueur  
H hauteur  
T profondeur

### Faces

a Lit d'attente  
b Lit de joint  
c Parement

Illustration 18 Dénomination des faces des blocs en escaille (SUS 2013)

On distingue les pierres et blocs par leur dimension : pierres équarries (maximum 80 cm, grossièrement taillées, maniable encore à la main...) et les blocs plus volumineux (Fig. H. 2010). La mise en place est très importante pour l'efficacité de l'ouvrage : la liaison poids-force (frottement) ainsi que la complémentarité de forme sont très importantes. C'est pourquoi les pierres non équarries ne permettent que rarement la construction d'ouvrages performants. Un appel d'offre précis ainsi qu'une surveillance des travaux à et dès la première livraison est primordiale. Les chapitres du 181 ou 241 du CAN sont très utiles à cet effet.

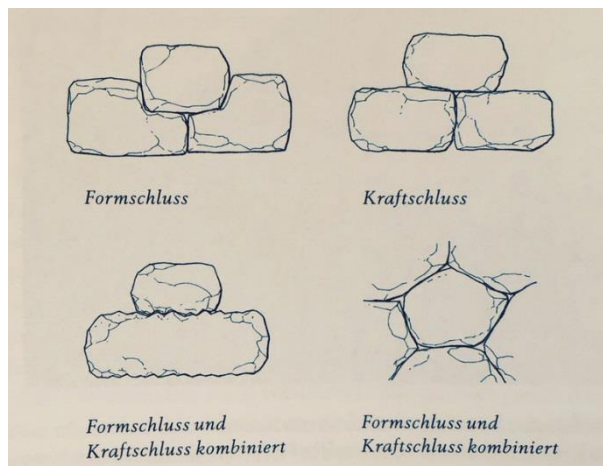


Illustration 19 Dans la construction de murs en moellons, la liaison force (Kraftschluss) et la complémentarité de forme (Formschluss) ne s'obtiennent que par un équarrissage +/- fin. (SUS 2013).

Selon les pierres à disposition et les concepts, diverses manières de construire sont utilisées. De manière générale, on distingue la pose en lit parallèle de l'appareil polygonal.

## Garnissages et remplissages

Les éléments de construction en contact avec le terrain, après la pose des éléments préfabriqués ou le décoffrage, doivent être garnis afin d'assurer la continuité avec le terrain en place. En général, on utilise les matériaux trouvés sur place. Néanmoins quelques points sont à respecter (SN 640 383A).

- Il faut éviter une augmentation de la pression hydrostatique contre un ouvrage. C'est pourquoi un matériau drainant est souvent mis en place (gravier grossier, natte drainante). Si l'on y renonce, il faut s'assurer que les matériaux en place soient suffisamment perméables. Les chemises drainantes doivent être posées jusqu'à la surface.
- Le poinçonnement d'ouvrages lors de remplissages ou remblayages doit absolument être évité. Les blocs et grosses pierres ne peuvent pas simplement être déversés, il faut les mettre soigneusement en place et éviter le contact direct avec l'ouvrage.
- Le compactage du matériau de remplissage derrière l'ouvrage doit être possible. Pour rappel, il s'agit de compacter en couches de 30 cm max. Il faut ménager suffisamment de place pour que la machine de compactage puisse travailler. (Voir le chapitre sur le compactage).
- Les couches sont compactées avec un dévers en direction du drainage.
- Le remplissage derrière les ouvrages mixtes comme les caissons, la terre armée ou les remblais avec géotextile doivent être soigneusement compactés : il s'agit de garantir à long terme une transmission des forces bien répartie.

## Couches de finition ou d'usure

Une route est généralement dotée d'une couche de finition ou d'usure. Sa fonction est d'une part d'égaliser les irrégularités de la couche de fondation, de protéger la couche de fondation et, selon les cas, d'empêcher l'eau de pénétrer dans les fondations ou, au contraire, de permettre l'écoulement des eaux dans la fondation.

SN 640 741 différencie la couche d'usure (ou la couche de finition, ou la couche de roulement) en 3 catégories distinctes : la couche de roulement argileuse ou en marnes calcaires (imperméable, pente jusqu'à 12%, facilement constructible, peu d'entretien et recyclable) ou en gazon-gravier pour les routes nécessitant une surface perméable (généralement des routes peu sollicitées).

Les matériaux recyclés utilisés comme couche d'usures ne sont autorisés qu'exceptionnellement. Les granulats bitumineux peuvent être mis en place à la finisseuse sans couche d'usure pour 7 cm d'épaisseur. Les graviers recyclés P (95%) et B (80%) sont autorisés comme couche d'usure mais ne sont pas toujours adéquates pour cette utilisation. (Plus sur les graviers recyclés dans le chapitre matériaux recyclés en forêts).

Tableau 3 Comparaison des couches d'usure sans liant selon SN 640 741

	Liant argileux	Liant marno-calcaire	Gazon-gravier	(granulats bitumineux)
Forces liantes	Liaisons dipole-dipole Ponts hydrogène Forces de Van der Waal	Liaisons ioniques	Système racinaire	(bitume)
Épaisseur	50 – 70 mm	50 – 70 mm	-	Max. 70 mm,



Granularité	0/16, 0/22 liant	0/16, 0/22	0/63 (concassage superficiel)	0/16 Dmax 22
Fines (% de masse <0.063mm)	5 – 10 %	5 – 10 %	-	-
Durabilité	Complément tous les 10-20 ans, déneigement exceptionnel, jamais jusqu'au fond.	Complément tous les 10-20 ans, déneigement exceptionnel, jamais jusqu'au fond.	Reprofilage tous les 10 à 20 ans avec semis déneigement exceptionnel, jamais jusqu'au fond.	!?! déneigement exceptionnel, jamais jusqu'au fond.
Remarque	imperméable	(imperméable)	Eviter contamination avec humus, 3 mois avant de rouler, évacuer les feuilles mortes	Pertes en forêt La mise en œuvre est importante (météo chaude et humide)

Une couche de fondation faisant office de couche de roulement est un cas fréquemment rencontré en forêt. Des granulats non normés sont utilisés dans toute l'épaisseur nécessaire et, avant le compactage, les matériaux sont concassés avec un concasseur mobile sur une épaisseur de 30cm afin d'atteindre une surface suffisamment compacte et plane pour rouler. Le matériau doit contenir suffisamment de fines afin de lier les matériaux mais risque d'être gélif. Il faut éviter de rouler sur ce type de superstructure en période de dégel. L'avantage réside dans la possibilité d'apporter de nouveaux matériaux et de reprofiler après un passage au concasseur. Un autre avantage de la technique réside dans sa simplicité et son économie pour autant que les matériaux soient présents sur place (peu de transports et matériaux locaux).

La transition entre 2 couches de matériaux différents peut se révéler être délicate car :

- La portance varie
- La traction se modifie
- Il peut y avoir du lessivage.

## Drainages

Il est nécessaire d'évacuer l'eau dans de nombreuses situations. C'est le cas dans la construction routière, l'assainissement de glissements et dans les ouvrages en contact avec les terrains. Pour être en mesure d'évacuer l'eau, un matériau très perméable doit être mis au contact des couches aquifères. La perméabilité des matériaux est exprimée par le facteur k [m/s]. Le tableau 4 donne les facteurs k pour les principaux types de matériaux. En ce qui concerne les drainages, il arrive souvent que des fines soient entraînées par l'eau qui circule dans le matériau et s'y déposent, entraînant ainsi un colmatage. C'est particulièrement le cas dans les sols fins mais peu ou pas liant comme les limons et les sables fins. Le matériau drainant peut aussi perdre de sa qualité de perméabilité par précipitation chimique de substances en solution dans l'eau (concrétion), généralement du calcaire (tuff). Pour contrer ces phénomènes de colmatage du drainage, il est possible de recourir aux géotextiles qui assurent les fonctions de séparation et de filtration (CAN 237 826). Il faut néanmoins que les perméabilités des matériaux et géotextiles soient compatibles. Dans le cas contraire, les mêmes phénomènes de colmatage peuvent s'observer au niveau du géotextile et entraîner l'imperméabilisation de celui-ci ; l'eau cherchera alors une voie hors du système de drainage. Le tableau 4 donne un aperçu des géotextiles à employer avec les différents matériaux.

Tableau 4 Facteur de perméabilité k et maillage des géotextiles selon SN 670 125a.

Matériaux	Valeur k [m/s]	Maillage géotextile
gravier	$> 10^{-2}$	2.0 mm
gravier sablonneux	$10^{-2}$ à $10^{-4}$	0.4 – 2.0 mm
sable grossier	environ $10^{-3}$	0.4 – 1.0 mm
sable moyen	$10^{-3}$ à $10^{-4}$	0.4 – 1.0 mm
sable fin	$10^{-4}$ à $10^{-5}$	0.2 – 0.5 mm
sable limoneux	$10^{-5}$ à $10^{-7}$	0.2 – 0.5 mm
limon, selon teneur en argile	$10^{-6}$ à $10^{-8}$	0.2 – 1.0 mm
argile	$10^{-8}$ à $10^{-11}$	0.3 – 1.0 mm

} Mat. drainant grossier suffit, car les sols sont très liants

Les matériaux assez grossiers sont adaptés à la fonction de drainage. Leurs propriétés drainantes sont omnidirectionnelles et stables. Il faut éviter une granularité trop grossière dans les sols sujets à lessivage car le matériau se colmaterait trop rapidement. Les matériaux



drainants doivent être non gélifs. Les matériaux naturels 32/50 ou les granulats pour béton 22/32 (CAN 237 812) sont souvent employés. Selon les régions et les matériaux disponibles il est aussi possible de travailler avec des refus de tamisage (140/400). (Voir à ce propos les exemples de drainages sur [www.fobatec.ch](http://www.fobatec.ch)). Il s'agit donc de dimensionner large ces dispositifs de drainage car les zones proches des terrains en place se colmatent rapidement.

## Etancher

Etancher est une nécessité fréquente. Que ce soit dans une chambre de captage, lors de l'aménagement d'un étang ou de fossés d'évacuation des eaux, les applications ne manquent pas. Dans ces applications il est aussi possible d'utiliser des matériaux meubles naturels d'une granularité adéquate. Plus le volume de pores dans un matériau est faible, plus la perméabilité diminue. Les argiles sont très denses et imperméables et conviennent aux travaux d'étanchéification. Les argiles sont obtenables en poudre ou en masse plastique et sont composés de divers minéraux. Dans la construction, la bentonite, une argile où la montmorillonite est dominante, est souvent utilisée. La montmorillonite confère à la bentonite sa grande capacité d'absorber l'eau et de gonfler. En suspension, la bentonite est utilisée comme fluide de forage et de la pose de paroi moulée pour soutenir les parois des excavations. Utilisée en poudre avec des géotextiles, la bentonite permet de réaliser des couches étanches dans les décharges, d'étanchéfier des voies d'eau de toutes sortes et protéger les routes contre des infiltrations d'eau des terrains avoisinants, les terrains hydromorphes en pente surtout.

Il est possible de se procurer des briques de ce matériau avant leur passage au four et de les utiliser comme masse plastique dans les ouvrages à étancher.



# Exploitation, préparation et amélioration de graves (matériaux primaires), Jacques Grob

## Exploitation

### Cadre juridique

L'exploitation de roches, matériaux meubles et terres sont soumises à autorisation selon plusieurs lois. Il s'agit de procédures complexes sur lesquelles nous ne nous attarderons pas. Les législations cantonales ont mis en place des procédures spécifiques. Un certain nombre d'éléments communs se dégagent toutefois :

- Un site d'exploitation potentiel doit être inscrit dans le **plan d'aménagement cantonal**, c'est à dire qu'il doit être légitime du point de vue de l'aménagement du territoire. C'est une décision d'ordre politique, elle doit correspondre à un besoin économique dont l'importance du point de vue de l'intérêt général est avérée.
- En deuxième lieu, le site doit être porté au **plan d'affectation** du territoire qui est de compétence communale ou cantonale. L'emprise, la profondeur, l'aménagement du site, la desserte et les étapes de l'exploitation y sont fixées. Ce document est le pendant des plans de zone constructible ou plan de zones et représente un caractère obligation pour les collectivités locales.
- En troisième place la procédure du **permis de construire** permet de fixer les détails techniques, les constructions et installations nécessaires à l'exploitation. Certains cantons lient cette phase avec le plan d'affectation si ce dernier contient les détails indispensables.
- A partir d'un certain volume, l'exploitation d'une gravière ou d'une carrière nécessite une **étude d'impact sur l'environnement**. L'EIE peut intervenir à tous les niveaux, elle se concentre cependant sur le permis de construire où toutes les activités émettrices sont connues de manière détaillée.

Cette procédure est trop longue et trop compliquée pour l'examiner en détail. Le propos suivant est l'exploitation (hors toute considération légale) de matériaux in situ ou à proximité d'un projet de construction soumis à la procédure du permis de construire.

En effet, il est parfois judicieux de combiner l'exploitation de matériaux et leur emploi dans la construction dans le cadre d'un même permis de construire. Il s'agit alors d'utiliser des matériaux de fouille pour les utiliser sur place ou à proximité, que ce soit des matériaux excavés ou déblayés lors du reprofilage d'un talus pour être mis en dépôt dans un accident du relief, de l'aménagement places de dépôts permanentes ou temporaires. Il s'agit alors de réunir trois conditions et garanties préalables :

- Que tous les mouvements de masses fassent partie du permis de construire, conformément au projet,
- Que ces mouvements soient nécessaires et justifiables pour la construction, également dans le bilan des matériaux,
- Que tout mouvement de matériaux cesse après complétion du chantier.

## Matériaux meubles primaires

Il convient de mentionner les dépôts fluvio-glaciaires qui sont très recherchés parce qu'ils sont souvent naturellement triés. Les dépôts en eau calme ou lacustres sont par contre peu adéquats en raison de leur teneur en fines très élevée.

Les moraines sont plus délicates à exploiter car leur teneur en matériaux fins est élevée et elles sont très compactes. Il en va de même pour les éboulis et les matériaux résultant des grands éboulements tardiglaciaires (Sierre, Flims) qui constituent en fait la transition vers la roche-mère.

L'exploitation de matériaux meubles de l'horizon C nécessite beaucoup de travail et comporte des risques. D'une part la qualité granulométrique a souffert de la dégradation du temps et d'autre part les infiltrations de matière humiques doivent être éliminées.

L'exploitation des matériaux dépend de leur exploitabilité. Elle peut se faire à la chargeuse sur pneus, au bulldozer ou à la pelle hydraulique. Les dépôts tirés des lacs, rivières et nappes phréatiques s'exploitent au moyen de dragues à godets. Le foisonnement pour le sable fin correspond à 1.1, 1.25 pour les graviers.



## Roches concassées

Du point de vue des techniques d'exploitation, il faut distinguer les roches fortement compactées de celles qui le sont moins. C'est dans les particularités de leur genèse géologique qu'il faut en chercher la raison.

La croûte terrestre résulte du refroidissement de la matière et des mouvements tectoniques qui s'ensuivent. Lors des mouvements de la croûte rigide sur une masse en fusion, des remontées de laves se sont produites et ont formé les premières chaînes de montagne primaires de roches cristallines dont la structure est marquée par un processus de refroidissement plus ou moins lent. En règle générale, plus le refroidissement est lent plus il se forme de grands cristaux. Les basaltes sont refroidis rapidement, ce qui leur confère une structure semblable au verre. Les granits ont subi un refroidissement plus lent en raison de la profondeur à laquelle ils se sont refroidis : leur structure granuleuse résulte de la formation de cristaux et reflète un processus de refroidissement lent pendant lequel les éléments ont eu le temps de migrer dans la masse et de s'arranger entre eux selon leurs affinités chimiques. Certains avancent l'hypothèse selon laquelle les premières chaînes de montagnes basaltiques s'élevaient jusqu'à 15000 m ; ce qui est certain c'est que ces chaînes ont été érodées et se sont retrouvées sur les fonds d'océan.

Les mouvements de la croûte terrestre suivants ont enfoui ces dépôts originaux qui se sont transformés sous l'effet combiné de la chaleur et de la pression pour former les massifs cristallins comme celui de l'Aar. D'autres roches se sont formées par précipitation chimique (principalement du calcium, du soufre et du magnésium contenu dans les eaux des océans peu profonds) des éléments dissous ou en suspension dans l'eau. Ces dépôts fins et compacts ont formé les Alpes calcaires des Préalpes ainsi que les plissements et plateaux jurassiens. Des roches de genèse plus récentes se sont formées dans les marges côtière des Alpes alors très actives, parfois lors d'effondrements sous-marins rapides des dépôts divers qui formaient les bords du plateau continental. Ces processus ont engendré des roches plus tendres, plus hétérogènes, moins compactées parce qu'elles n'ont pas subi de transformation (pression et chaleur) dans les profondeurs de la croûte terrestre. Il s'agit principalement de la formation de la molasse comprenant des conglomérats grossiers mais assez bien consolidés qui forment certains massifs du plateau suisse comme le Napf et le Rigi ou des dépôts peu consolidés et plus fins car formés en eau profonde comme le flysch ainsi que des grès de qualité diverses selon que leur ciment est marneux ou calcaire. Ces grès de la molasse (appelés « molasse » et souvent de couleur grise à verte) ont été exploités pour la construction comme en témoignent de nombreuses villes du plateau (Fribourg, Berne, Zürich et St-Gall). Malheureusement, ces pierres ne supportent pas la pollution moderne, elles souffrent principalement de l'acidité des précipitations.

Ainsi nous avons à faire en Suisse, à part les roches cristallines des massifs anciens, à une multitude de matériaux secondaires qui sont en fait des montagnes recyclées ayant déjà un cycle géologique derrière elles. Les autres matériaux meubles actuels sont le résultat de l'activité des glaciers pendant l'ère du quaternaire qui ont encore contribué à un mélange supplémentaire, mêlant matériaux primaire et secondaires et dont la composition dépend beaucoup de la localisation du dépôt. La part d'éléments cristallins permet de caractériser la qualité de ces dépôts.

Que nous réserve l'avenir en ce qui concerne les matériaux meubles ? Les sites des dépôts exploitables sont déjà construits ou ceux accessibles arrivent en fin d'exploitation. L'avenir appartient ainsi aux roches compactes. Le marché se trouve sur le Plateau formé, lui, de matériaux qualitativement problématiques. Lors de la construction de desserte en montagne, on tombe souvent sur des matériaux de bonne qualité mais qu'il est impossible d'exploiter à grande échelle, faute de place pour les installations de transformation mais aussi en raison des faibles quantités.

Sous la dénomination de « matériaux concassés » on entend une matière première (ballast, gravier, gravillon) qui résulte de l'exploitation et de la réduction de roche compacte. Ils se distinguent (à l'exception de certains conglomérats) par des arêtes vives produites par le concassage et de peu de surfaces arrondies. L'exploitation est généralement réalisée à ciel ouvert même si l'exploitation par galeries gagne en importance. L'exploitabilité dépend en grande partie de la dureté de la roche et de son degré de fissuration. D'autres éléments entrent en considération tel que l'environnement, les conditions hydrogéologiques et la destination du matériau. Les méthodes vont de la pelle hydraulique munie de ripper jusqu'au minage à l'explosif. Pour le stockage et le transport, le foisonnement de la matière est un paramètre important qui dépend du traitement de la matière. Selon les normes, ce paramètre varie de 1.5 à 1.85. Le matériau est ensuite broyé ou concassé selon son usage prévu.

Selon la pétrographie respectivement la résistance à la compression de la roche-mère, on distingue les roches dures des roches mi-dures. Les calcaires siliceux du nord des Alpes sont des représentants répandus des roches dures.

Les roches dures concassées sont employées principalement pour le ballast des voies de chemin de fer mais trouvent aussi leur application comme matériau de fondation des routes et comme granulat dans les revêtements asphaltés ou bétons bitumineux ainsi que comme granulat pour les bétons. La forme cassée des grains constitue un avantage par rapport aux grains ronds : une meilleure portance et résistance à l'usure en général.

Dans la construction forestière, l'exploitation et l'utilisation de roches sur place a un sens, en particulier lors de l'élargissement ou de la construction en terrain pentu. Pour les appels d'offre, en plus du volume de rocher à exploiter, il est important de préciser la nature et l'exploitabilité de la roche ainsi que l'utilisation prévue du matériau. Le chapitre 211.323 du CAN fait la différence entre :

- Roche facile (spatule de compresseur),
- Rocher dur (marteau piqueur, marteau hydraulique, brise-roches),



- Rocher à ripper (bulldozer travail horizontal par couches),
- Toutes les roches (coin hydraulique, slurry à expansion)
- Minage (hauteur, quantité d'explosif)



Illustration 20 Exploitation de roches compactes par tir de mine (gauche) et réduction du matériau par concassage (droite)





## Problèmes spécifiques rencontrés avec les matériaux pierreux

Il s'agit de respecter certains principes lors de l'utilisation de matériaux pierreux afin d'éviter des erreurs grossières.

### Roches tendres

Les roches tendres, friable et poreuses ont été exposées à la dégradation du temps. Si elles sont présentes dans les granulats, ces derniers ne sont pas résistants au gel. Ces granulats proviennent principalement de couches de **marnes ou de grès sablonneux**. Le ciment des conglomerats peu compact de la Nagelfluh en font partie aussi. Ils absorbent l'eau et se détériorent sous l'effet du gel. C'est problématique pour les matériaux de fondation mais encore plus pour les granulats à béton. En se détériorant, ces granulats forment des cratères à la surface du béton, facilitant ainsi l'accès de l'air et des intempéries à l'armature. De ce fait découle aussi l'importance du recouvrement de l'armature par le béton. Il faut que le recouvrement de l'armature par le béton soit plus grand que le diamètre maximal des granulats. Dans ce contexte, il faut mentionner que les granulats recyclés produisent des bétons qui n'affichent que le tiers de la résistance des bétons produits avec des granulats primaires. On comprend ainsi qu'il est difficilement envisageable de construire en pont en béton à partir de granulats recyclés

### Roches cristallines

Les roches cristallines peuvent contenir des métaux lourds voire être radioactives. Les gneiss du massif de l'Aar au Grimsel contiennent beaucoup d'uranium (au-dessous de la limite d'exploitabilité commerciale). Ces granulats ne doivent pas être employés dans les bétons destinés à la construction d'habitation par exemple.

Certains silicates contenus dans les roches cristallines peuvent poser problèmes car ils ne réagissent pas avec le ciment pour une bonne prise. C'est tout particulièrement le cas des silicates micacés. Les ponts de l'autoroute A2 au Tessin ont été construits avec des granulats en provenance du canton de Zürich (gravière du Rhin de Rafzerfeld) car les roches locales contenaient trop de micas.

### Roches hygroscopiques

Les roches peuvent être poreuses et absorber l'eau. C'est le cas des laves ou des scories mais aussi de certains calcaires comme le lapié calcaire urgonien (nappe de la dent de Morcles) ou certains calcaires du Jura, durs mais poreux. Cela pose surtout un problème pour les bétons car les granulats absorbent l'eau et il faut continuellement humidifier le béton pour assurer la prise hydraulique. Il est quasiment impossible d'obtenir un rapport E/C stable<sup>1</sup>.

### Roches réactives

Certaines roches peuvent engendrer des réactions malvenues dans les bétons. Sous le terme générique de cancer du béton se cachent différents processus de nature chimique :

- RAS = réaction alcali-silice
- RAG = réaction alcali-granulats

Pour faire simple, il s'agit des bases libres dans le béton qui réagissent avec l'acide silicique pour former des efflorescences de chaux (Ca(OH)), de quartz et de silicates de calcium dans la structure du béton qui, avec le temps, se dégrade.

La plupart des roches en Suisse sont moyennement réactives. Si l'on utilise des ciments pauvres en bases, il est tout à fait possible de produire du béton résistant au phénomène. Les ciments utilisés doivent être pauvre en ciment portland, riche en bases (Cem I). C'est une des raisons qui explique pourquoi la production de ciment Portland a fortement diminué en Suisse. Ce qu'il importe de savoir est que le phénomène est particulièrement important en génie civil pour les éléments qui restent humides, dans les prises d'eau et tunnels par exemple. C'est pourquoi il faut éviter d'utiliser pour les ouvrages de charge des aqueducs forestiers des granulats pris sur place auxquels on ajoute vite fait quelques sacs de ciment sans prendre quelques précautions, par exemple pour éviter le ciment de qualité portland (Cem I).

Il existe des roches hautement réactives (grès à opaline, silex, grauwacke<sup>2</sup>) qui sont heureusement assez rares en Suisse. En Allemagne, dans les années 60, des traverses de chemin de fer réalisées avec un granulats de cette qualité ont dû être changées sur des milliers de kilomètres de tracé. Un pont a dû être refait après deux ans seulement. Lors de l'emploi de granulats recyclés à partir de béton, il faut garder à l'esprit que ce granulats contient déjà des bases dans le ciment employé alors. Le risque de voir une réaction RAG est d'autant plus élevé ; le béton à partir de granulats recyclés devrait être évité dans les ouvrages présentant un profil de contrainte élevé.

### Contamination organique

Les matériaux meubles peuvent être contaminés par de la matière organique en provenance des horizons supérieurs et de la végétation. Ces éléments peuvent perturber considérablement la prise hydraulique. La contamination peut se produire après un lavage insuffisant de la benne de transport.

---

<sup>1</sup> Le rapport E/C eau/ciment est important pour la qualité du béton, en particulier sa résistance. Cette valeur étant pondérée par l'humidité relative des granulats, on comprendra la difficulté que représente un granulats qui pompe l'eau

<sup>2</sup> Variété de grès siliceux de couleur sombre, à ciment riche en chlorite et en éléments de roches volcaniques



## Préparation et amélioration

Il existe plusieurs méthodes pour préparer et adapter les graves à une utilisation spécifique. Le tri des grosses pierres aptes à la construction ou au pavage des matériaux plus fins, en particulier le sable pour la préparation de mortier (en ajoutant du calcaire puis du ciment) est certainement la méthode la plus ancienne.

### Tamissage

Le tamisage a pour but d'obtenir un fuseau granulométrique adapté à la destination du matériau. Dans un premier temps, il s'agit surtout de séparer les fractions afin d'obtenir d'un matériau mélangé des granulats d'une grosseur plus ou moins identique : des sables pour le mortier ou l'enrobage, des graviers fins pour la fonction de filtre, des graviers plus grossiers pour les drainages, etc.

Pourtant, en quantité traitée, le tamisage sert surtout à séparer les fractions dans le but de les recomposer afin d'obtenir un fuseau granulométrique adapté à l'utilisation spécifique de la grave. Les graves naturelles, fruit de processus de transport et de sédimentation très complexes, sont très hétérogènes dans leur composition. La construction exige aujourd'hui une composition homogène car les exigences de qualité ont augmenté conjointement avec les contraintes mécaniques croissantes que la construction d'aujourd'hui impose. En particuliers les granulats doivent **avoir une densité élevée, c'est-à-dire contenir le moins possible de vide**, tout en ménageant suffisamment d'espace entre les grains pour permettre l'action d'un liant - un ciment par exemple. Pour les bétons, en plus de la granulométrie, on cherche à optimiser la porosité des sables afin que, selon le dosage, le ciment parvienne à remplir les pores et vides ; la résistance du ciment n'étant pas aussi élevée que celle des grains de roche.

Les sortes usuelles de sables résultant du tamisage sont les fractions **0-4mm, 4-8mm, 8-16mm et 16-32mm** auxquelles il est possible d'en ajouter d'autres selon les besoins. Il est possible de tamiser à sec ou mouillé, dans le cas où les matériaux fins et liants gêneraient le tamisage à sec.

Les compositions de matériaux telles que décrites garantissent aussi la meilleure qualité en ce qui concerne la perméabilité, la résistance au gel et l'aptitude au compactage. Le tamisage constitue ainsi une amélioration efficace des matériaux meubles.

En forêt, des moyens très simples apportent souvent de bonnes solutions (voir illustration 21)



Illustration 21 Tamis simple alimenté par une pelle.

### Lavage

Par le lavage on cherche avant tout l'élimination des éléments organiques et autres impuretés. Il s'agit aussi de réduire la fraction la plus fine afin d'atteindre les valeurs tolérables. Un tamisage à sec ne permet pas toujours d'atteindre les valeurs souhaitées. Pour les bétons, il faut remplacer les fines (argiles et limons qui ne permettent pas la prise hydraulique) par du ciment. Les normes prescrivent des teneurs maximales (et minimales) en fines.

Les fines ont tendance à s'agglomérer et le lavage permet d'éliminer les agrégats de fines qui pourraient passer pour des granulats lors du tamisage à sec et produire un béton de mauvaise qualité. Un béton qui s'écaille en surface est problématique. S'il s'agit de roches tendres qui produisent des éclats, les normes montrent une certaine tolérance (faible). Les granulats d'argile sont, par contre, catégoriquement proscrits par les normes.

Une troisième raison importante du lavage réside dans le décapage des granulats afin de permettre au ciment d'adhérer convenablement au granulat. Un granulat enrobé par une pellicule de fine ne permettra pas une bonne liaison entre sa surface et le ciment. En effet dans les bétons, les granulats réagissent chimiquement en permanence avec le ciment, c'est pourquoi une surface propre et franche de granulat est nécessaire. Après le lavage, les matériaux peuvent être encore tamisés pour atteindre la granulométrie souhaitée.



Le lavage des matériaux meubles produit de l'eau qui doit subir un traitement :

- Dessablement
- Décantation pour éliminer les fines
- Recyclage de l'eau

Ces processus de lavage et de recyclage nécessitent une installation importante et des machines. Cela entraîne un coût important et n'est certainement pas une solution dans le cadre de la construction en forêt.

## Concassage

Lors de la production de matériaux pierreux, il y a beaucoup de refus. 80% de la demande en matériaux pierreux a pour destination la fabrication de béton et 20 % la production de revêtements asphaltés. Le diamètre maximal de granulat de ces deux produits est principalement de 32 mm maximum, voire même plus fin. Une grosse quantité de refus doit donc être réduite, ceci non pas seulement dans les carrières mais aussi dans les gravières, qu'elles soient sur des gisements fluvio-glaciaires ou des moraines.

Une partie importante de matériaux doit donc être cassée.

Le type de concasseur le plus ancien date de 1858. Le concasseur à mâchoires, inventé en Amérique, est encore très répandu aujourd'hui en raison de son aspect économique et sa robustesse. Nécessitant peu de force, les pierres sont concassées entre deux tôles d'acier entraînées par un volant massif permettant de traiter des diamètres importants ; ce type de concasseur ne s'use que très peu. Son défaut réside dans son poids et son coefficient de réduction maximum de 6:1 : un bloc de 1 m d'arrête donne un 0-160 mm avec des pierres jusqu'à 200mm. Pratiquement, il faut donc un 2<sup>ème</sup> passage pour obtenir un matériau intéressant.

La forme des granulats représente un inconvénient majeur des mécanismes de réduction des matériaux reposant sur le concassage par pression, broyage ou frottement : il y a une fraction importante de grains pointus, allongés ou plats qui ne se laissent pas facilement compacter, soit dans les fondations soit dans un revêtement asphalté.



Illustration 15 Concasseuse à mâchoires mobile sur chenilles avec un tamis en tête pour éliminer la fraction la plus fine (GIPO AG).

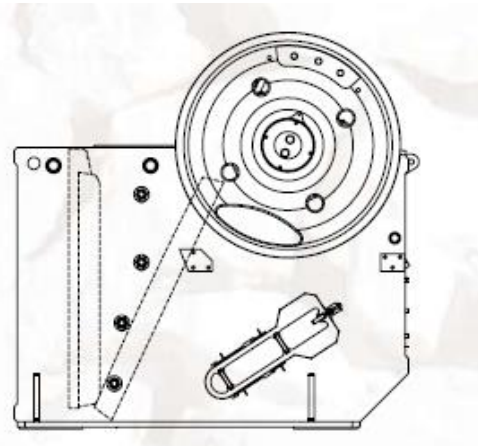


Illustration 23 Représentation schématique d'un concasseur à mâchoires. Une mâchoire est fixe et on notera le volant massif (GIPO AG).

Les concasseuses à percussion (ou broyeuses à impact) reposent sur le principe du choc produit par la projection des matériaux sur une surface pour les réduire. Lors du choc les matériaux ont tendance à se fractionner selon leur clivage naturel et conservent ainsi des formes cubiques qui confèrent aux matériaux une qualité élevée, telle qu'érigée par les normes. Les matériaux sont déversés sur un rotor muni de marteaux d'un alliage au manganèse tournant à vitesse élevée et qui projette les granulats sur des déflecteurs revêtus d'un alliage similaire. Le matériau reste dans le tambour du concasseur jusqu'à la dimension souhaitée. Ce système permet un facteur de réduction de 50:1. La granulométrie souhaitée peut être obtenue en un passage et modulée selon l'angle d'incidence sur les parois du tambour, la distance entre le rotor et les déflecteurs ainsi que la vitesse de rotation du rotor. Ce système est idéal pour les matériaux recyclés en raison des nombreux réglages possibles et il garantit une bonne séparation des restes d'armature métallique du matériau pierreux.

Une usure des revêtements en alliage de manganèse, la haute consommation en énergie en raison des régimes élevés du rotor et des coûts trois à cinq fois plus élevés qu'un double passage dans un concasseur à mâchoires sont les défauts du système.



Illustration 24 concasseuse à impacts sur chenilles avec triage de différentes fraction (GIPO AG).

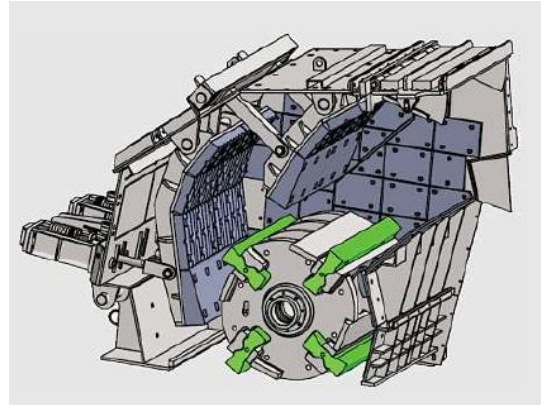


Illustration 25 Eclaté d'une concasseuse à percussion avec les marteaux en vert, et les parois (déflecteurs) en gris, les pièces principales à usure élevée (GIPO AG).

Tendances actuelles :

- Systèmes à mâchoires : concassage préliminaire sans exigences élevées de qualité, production de sable avec concasseur à cylindre
- Systèmes à percussion : granulats normés et recyclage

Les produits concassés sont plus difficiles à compacter. Par contre une fois compactés, la masse est plus stable parce que les formes aigues ne roulent pas, contrairement aux graviers ronds. Les tendances suivantes sont observées :

- Les revêtements bitumineux sont principalement composés de produits concassés. Le liant élastique et collant ainsi que la relative minceur de la couche permettent un bon compactage et l'imbrication des granulats empêchent le laminage de la couche par le trafic.
- Les granulats ronds entrent de préférence dans la préparation du béton : le vibrage en est facilité. Peu de gravière produisent un granulats à 100% rond. Avec jusqu'à 30 % de granulats concassés, les propriétés du béton à la coulée et au vibrage sont toujours satisfaisantes. En cas d'utilisation exclusive de granulats concassés, un soin tout particulier doit être accordé au vibrage, plus de vibreurs sont nécessaires, partant plus de personnel. La moindre négligence se paie comptant au décoffrage.
- Pour les granulats sans liants, les mélanges ont fait leurs preuves. Un matériau exclusivement composé de granulats concassés, qui laissent relativement beaucoup de vide, particulièrement les grossiers, a tendance à se tasser avec le temps : comme pour le ballast des chemins de fer, les vibrations du trafic finissent par user les arrêtes des granulats.

Parfois, il est nécessaire de laver les produits concassés. Les produits concassés doivent être tamisés de la même façon que les produits naturels.

Pour la construction de routes forestières, on a recours à des concasseuses mobiles montées à l'arrière d'un tracteur. Il s'agit surtout de casser la plus grosse fraction et de mélanger les matériaux afin de rendre possible l'égalisation et le compactage. Le tamisage n'est alors pas possible et la profondeur de travail ne dépasse pas les 40 cm. Lors de travaux de rénovation d'un chemin, il est souvent nécessaire de travailler préalablement au ripper les couches profondes et compactées afin de réaliser un bon mélange avec les apports de matériaux frais qui peuvent avoir une granulométrie 1/400. Plusieurs passages permettent d'obtenir alors couche portante correcte, homogène et faisant aussi office de finition. Les matériaux calcaires ou morainiques (avec suffisamment de fines) sont particulièrement adaptés pour une prise de la couche d'usure. Il faut veiller à une bonne humidité des matériaux pour le compactage, ce qui est rarement le cas lors de la mise en place. Il est recommandé de fermer le chemin à la circulation jusqu'à la prochaine pluie et d'effectuer un ressuyage afin de laisser la prise se faire.

Lors d'une nouvelle construction, la méthode dépend de la qualité des terrains. Les zones de faible portance doivent être identifiées au préalable. Une plus grande profondeur de fondation ou tout autre mesure de consolidation (radier en bois rond, stabilisation à la chaux /ciment p.ex.) doit également être prévue.



Illustration 26 Les matériaux calcaires provenant de l'élargissement sont broyés par la concasseuse tractée. Un ripper est installé à l'avant du tracteur (PTH gmbH).



Illustration 27 Apparence après un passage (PTH gmbH).



Illustration 28 Un godet broyeur peut rendre des services sur les chantiers éloignés ou de peu d'importance. (bap Ing.).



## Liants

Une grande partie des granulats sont utilisés avec un liant. Par le passé, les hommes ont utilisé des liants permettant de faciliter la construction : les déjections animales comme mortier pour jointoyer les moellons ou mélangé avec du sable pour enduire les murs. Des résines naturelles ont été employées pour coller les granulats. Parmi ces produits de la nature, le bitume se distingue par son emploi très répandu comme liants pour les granulats. Produit de l'évaporation naturelle des fractions les plus légères du pétrole, le bitume ne réagit pas chimiquement avec les grains des matériaux mais conserve durablement son caractère élastique dans les interstices.

Avec une élévation de la température, l'élasticité et le pouvoir d'adhérence du bitume augmente, ce qui permet de réactiver ces propriétés dans les enrobés recyclés. La question est de savoir à quel point ces qualités sont réactivées dans un enrobé recyclé car leur provenance et âge sont très hétérogènes. Si l'on rajoute trop de nouveau liant, on parle ici d'une fourchette entre 5 et 7% du produit à poser, le revêtement sera trop mou, surtout avec les températures élevées de l'été. La circulation lamine le revêtement, crée des ornières et des ondulations dans les montées ou descentes, dans les zones d'accélération ou de freinage.

Les enrobés recyclés sont introduits dans un tambour sécheur enrobeur à froid, puis ils sont réchauffés et mélangés progressivement avec les nouveaux matériaux dans une proportion de 30% dans un premier temps pour augmenter par la suite à 50 voire 60%. Dans les installations modernes on cherche à utiliser 100% de matériaux recyclés, mais des corrections doivent presque toujours être faites, en ajoutant du liant et des matériaux fins, si bien que le matériau finalement mis en place n'est qu'à 90% recyclé.

Pour la petite histoire, on utilise aujourd'hui aussi des matériaux pierreux liés avec des résines synthétiques, par exemple de l'Araldit, pour la fabrication de bâtis de machines de haute précision en raison de leurs meilleures caractéristiques de stabilité thermique que les bâtis en fonte d'acier. Des applications semblables sont utilisées pour des regards, des canaux et sols en pierre synthétique.



Illustration 29 Pose d'un enrobé bitumineux AC T 16N sur une fondation 0/45, respectivement sur un réglage (AWN SZ).



Illustration 30 Pose d'une couche de fondation d'AC F 22, qui peut contenir jusqu'à 85% de recyclé (Catram).

**Les liants hydrauliques** forment une autre catégorie de liants. L'observation selon laquelle les matériaux sableux et les graviers se solidarisent en séchant est très ancienne. Le phénomène s'observe sur les plages et les chemins. Ces propriétés ont été mises à profit dans la construction de murs en blocs et moellons ainsi que pour le pavage de routes. Le calcaire est la clé de ce phénomène et il est abondant dans la nature. Ainsi les matériaux meubles liants issus des affleurements de calcaire, de marne ou de Nagelfluh peu compactée sont abondamment utilisés dans la construction de routes forestières.

Plus tard, on a appris à calciner le calcaire pour produire de la chaux afin d'améliorer son pouvoir liant. Lors de l'élévation en température les silicates (argiles) et les oxydes métalliques (aluminium, fer), de la marne se lient fortement avec l'oxyde de calcium (CaO). Toutes ces molécules ont une affinité chimique extraordinaire avec l'eau et l'incorporent dans la structure atomique en durcissant (prise hydraulique). Connus depuis les romains, les processus et la composition ont été améliorés pour aboutir au 19<sup>ème</sup> siècle au ciment portland qui, par la phase du clinker (résultat du fort échauffement du calcaire et de l'argile (1500 degrés) : décarbonatation du calcaire, scission des argiles en silice et alumine et combinaison de ces derniers avec la chaux) puis refroidissement du clinker et mouture pour aboutir à un produit qui eut et a encore un énorme succès.

Ce liant, mélangé à de l'eau et du sable (mortier) et du gravier (béton), permet de former en quelques heures par des liaisons chimiques durables une roche dure comme les poudingues que la nature a mis des millions d'années pour former.

Lors du recyclage, il n'est pas possible de reconstituer le pouvoir liant. Lors du concassage, la matière se casse selon les duretés hétérogènes, le plus gros gravier se séparant du reste, le sable et le ciment formant des granulats de dureté plus faible mais tout de même non gélifs, ce qui explique pourquoi les bétons avec des granulats recyclés n'ont pas la même résistance qu'avec des granulats naturels.



Illustration 31 Chemin béton (bap Ing.)



Illustration 32 Pose de la dalle béton à la finisseuse à coffrage glissant et passe à la brosse pour structurer la surface (Amrein Gebr. AG).

Le tour d'horizon des liants hydrauliques dans la construction ne serait pas complet sans mentionner la spécialité de la stabilisation des matériaux meubles en place à la chaux ou au ciment. L'essentiel dans cette technique ne réside pas dans l'effet liant, même si en théorie cet effet prend place, mais plutôt dans la fixation de l'eau. Dans les matériaux meubles fins, argileux et limoneux, plus il y a de l'eau, plus ils sont peu portants, mous. L'adjonction de ciment permet de soutirer l'eau et lier chimiquement le calcaire avec les minéraux présents dans les matériaux. De plus, les réactions chimiques échauffent la masse et élimine encore de l'eau par évaporation. Il faut absolument travailler la masse par temps sec. Ensuite le matériau doit être égalisé et compacté, empêchant ainsi l'eau de pénétrer dans la route. Il faut pourtant penser à l'évacuation des eaux de surface (lissage, devers). Suite aux travaux, le chemin terminé devrait donc être fermé à la circulation pendant quelques temps afin que la prise se fasse (Ndlr : 2-3 semaines) (Lang HJ et al. 2010).



Illustration 33 Épandage de ciment (AWN GR).



Illustration 34 Incorporation du ciment dans la masse (AWN GR).



Illustration 35 Traitement à la chaux de l'infrastructure d'un chemin (soubassement et talus) à partir d'une pelle rétro sur caillebotis (AWN SZ).



Illustration 36 Mélange de la chaux et des terrains à la fraise, réduction de l'eau et augmentation de la portance (AWN SZ).

En suffisance, les fines contenues dans les matériaux représentent le liant naturel élémentaire. Les couches d'usure en grave non normée constituent un bon exemple : il se produit une liaison calcaire ou argileuse entre les minéraux, les plus gros grains sont pris dans la masse. Une certaine humidité est nécessaire.



Illustration 37 Une couche d'usure nécessite des propriétés liantes. De la boue de lavage de gravière est ajoutée aux matériaux. (AU FL).



Illustration 38 La concasseuse permet de mélanger les graviers déposés avec la boue de lavage et réaliser une planie. (AU FL).



## Techniques d'amélioration des matériaux meubles.

### Compactage

Un bon compactage permet d'éviter le tassement, augmente la portance et homogénéise la couche. Cet effet est atteint en réduisant le volume des pores et, par conséquent, la perméabilité : la résistance au cisaillement augmente. Le compactage permet d'augmenter la masse volumique du matériau (masse volumique anhydre) (Lang HJ. et al., 2010).

Le compactage dépend de plusieurs facteurs : la granulométrie, la composition, l'homogénéité du mélange, le contenu en eau et l'épaisseur de la couche. D'autre part, la méthode de travail est déterminante pour la qualité du compactage. La partie suivante se concentre sur le compactage superficiel et ignore les méthodes spéciales pour compacter en profondeur.

#### Caractéristique de la granularité

##### Granulométrie/forme des grains

Les différentes compositions de matériaux réagissent différemment au compactage. Les fuseaux granulométriques verticaux ne se laissent que difficilement compacter, voire pas du tout : les grains de dimensions presque identiques ne permettent pas le remplissage des interstices. Les matériaux contenant toutes les fractions permettent aux grains de remplir au mieux les interstices sous l'effet des vibrations. Les refus (gros éléments) peuvent présenter des problèmes au compactage. Ils peuvent s'intégrer à la couche mais ménagent souvent des vides qui se remplissent par percolation et migration à l'usage et entraînent des tassements locaux. En formant des points d'appui pour les engins de compactage, ils empêchent le compactage uniforme.

Les matériaux concassés sont plus difficiles à compacter mais sont plus stables par la suite.

#### Mélange

Lors de la manipulation des matériaux meubles, on observe une ségrégation des composantes par fraction. Par exemple, lors de remblayages, les plus gros éléments roulent le long de la pente et se retrouvent au pied du talus. Ce phénomène de ségrégation se produit aussi lors des transports, du déversement et de la mise en place. Cela empêche un bon compactage. C'est pourquoi il est conseillé :

- Pose à la pelle ou à la lame (pas de déversement direct)
- La pose à la finisseuse garanti le mélange le plus homogène



Illustration 39 Pose à la finisseuse (AWN GR)

#### Contenu en eau

Les pores du matériau peuvent être remplis d'eau. Cela rend le compactage difficile. Si le matériau est saturé en eau le compactage n'est pas possible, les engins « flottent » comme sur un matelas. Les forces n'agissent plus sur les pores en réduisant leur volume, car ils sont pleins d'eau, cette dernière étant incompressible. En théorie, plus le matériau est sec, plus le compactage produira une densité élevée.

En revanche, un matériau absolument sec nécessitera un important travail de compactage car la plasticité aura pratiquement disparu en raison du manque d'eau (frottement élevé, colmatage entre autres). S'il reste possible de compacter, l'énergie nécessaire rend l'opération très coûteuse, donc non économique.

Entre ces deux extrêmes, drainé et saturé, chaque matériau nécessite une hygrométrie idéale pour le compactage.





### Épaisseur de couche

Le compactage a un effet limité en profondeur. C'est pourquoi il est nécessaire de compacter en couches. L'épaisseur de couche dépend de l'engin de compactage (poids, dimension, mécanisme d'action) et de la granulométrie. Une couche trop mince est aussi à éviter car les grains le plus gros empêchent une action sur les plus fins. Les règles empiriques suivantes sont à respecter pour l'épaisseur de couche (selon Byland 2013) :

- Au minimum **2 fois le diamètre maximal des grains les plus gros**,
- Pour les matériaux concassés et les granulats asphaltés au minimum **3 fois le diamètre** du grain le plus gros,
- Au maximum **40 cm (60cm pour un rouleau vibrant duplex lourd et une bonne granulométrie)**

### Modes d'actions

#### Compactage statique

L'effet de compactage est produit par le poids de l'engin. Le véhicule (un rouleau sans vibration) roule sur la surface, comprime en surface et lisse le matériau dans un même passage. L'effet de compactage est proportionnel au poids de la machine.

Cette manière de compacter est surtout valable pour les enrobés bitumineux (rouleaux en caoutchouc qui ont aussi un effet malaxant). Elle a aussi un sens pour rouler les surfaces en début de processus de compactage pour éviter la formation de vaguelettes indésirables ainsi qu'en fin de processus pour effacer les éventuelles traces d'autres engins de compactage ([www.hkl-baumaschinen.de](http://www.hkl-baumaschinen.de)).

#### Compactage dynamique

L'effet de compactage se produit par le poids et les vibrations. Par des mécanismes produisant des vibrations, des chocs ou des oscillations, le matériau est soumis à des mouvements internes qui entraînent un arrangement des grains et, par l'effet conjoint du poids, le comblement des vides. Ainsi le matériau s'homogénéise et se densifie.

L'effet du compactage dynamique atteint une plus grande profondeur. La fréquence des chocs génère des ondes qui se propagent en profondeur et améliorent l'effet de compactage.

Le compactage dynamique permet d'atteindre les valeurs souhaitées avec moins de passage d'engins que lors du compactage statique. C'est pourquoi cette technique est beaucoup plus souvent utilisée que le compactage statique. ([www.hkl-baumaschinen.de](http://www.hkl-baumaschinen.de)).

Tableau 5 Types de compactage et domaines d'utilisation (selon Byland 2013).

compactage	statique	frappant	vibrant	oscillant
Type de sol	liant (enrobés)		pulvérulent	
	fin		grossier	
	rond		concassé	
Teneur en eau	élevée		faible	
Engins	Compacteur à pneus ou autres sans la dynamique enclenchée	Pilonneuse	mono-cylindre, tandem, duplex, roul. de tranchée, c. adaptable, plaque vibrante	mono-cylindre tandem, duplex, roul. de tranchée

### Engins de compactage

Selon les objectifs et les particularités du matériau, les engins du tableau 5 peuvent être utilisés. Ils agissent par leur poids et la plupart sont dotés de mécanismes vibrants qui ont des effets dynamiques. Les engins modernes disposent de logiciels qui permettent d'adapter les paramètres de compactage (statique, vibration et oscillation) aux types de matériaux à compacter. Des systèmes GPS permettent de contrôler le nombre de passages.



Tableau 6 Engins de compactage et leur domaine d'utilisation: (E) Matériaux meubles, (B) Enrobés, source Ammann suisse SA, Hamm AG.

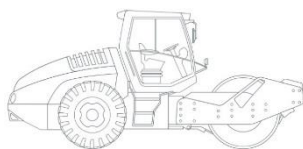


Illustration 40 compacteur mono-cylindre (E)



Illustration 41 Tandem (E/B)



Illustration 42 compacteur à pneus (B/E)



Illustration 43 Duplex (E/B)



Illustration 44 compacteur de tranchée (E)



Illustration 45 Pilonneuse (E)



Illustration 46 Compacteur adaptable (E)



Illustration 47 plaque vibrante (E/B)

#### Poids ([www.hkl-baumaschinen.de](http://www.hkl-baumaschinen.de))

Le poids se transmet au sol par la plaque de la pilonneuse ou par le bandage des cylindres. En règle générale plus le poids de la machine est élevé plus l'effet de compactage dans le sol est profond.

#### Charge statique/ charge statique linéaire ([www.hkl-baumaschinen.de](http://www.hkl-baumaschinen.de))

La charge statique (kg) correspond au poids du rouleau et de toutes les autres pièces de la machine. La charge statique linéaire se calcule en divisant la charge statique par la largeur du rouleau (cm).

#### Masse oscillante ([www.hkl-baumaschinen.de](http://www.hkl-baumaschinen.de))

La masse totale d'un engin correspond à la masse statique et la masse oscillante. Une masse oscillante à un axe produit des vibrations verticales (sauts) alors que deux masses oscillantes (2 axes excentriques synchrones) produit des mouvements horizontaux de va-et-vient particulièrement adaptés à la compactation de couches minces (permet une meilleure planéité). Plus la masse oscillante est grande, plus l'effet de compactage est profond.

#### Fréquence et amplitude ([www.hkl-baumaschinen.de](http://www.hkl-baumaschinen.de))

L'amplitude donne la hauteur du saut donné au cylindre par l'impulsion de la masse oscillante (donné en mm, généralement de 0.2 à 2 mm). La fréquence indique le nombre d'impacts par seconde de la machine sur le sol à compacter (Hz) ou aussi le nombre d'impacts par minute.

#### Vitesse de travail ([www.hkl-baumaschinen.de](http://www.hkl-baumaschinen.de))

Plus la vitesse de passage de la machine est lente et l'effet vibratoire important plus il y a d'énergie transmise au sol. A l'inverse, plus le passage est rapide à puissance de vibration égale, moins il y a d'énergie transmise dans le matériau.

La tension verticale induite par le compactage se réduit après le passage de la machine. En revanche la **tension horizontale a augmenté et conserve sa valeur** après le passage du compacteur. C'est pourquoi il faut être prudent en compactant le remplissage derrière un ouvrage.

#### Exigences de portance

Selon la norme SN 640 585, la portance de la planie de la couche de fondation pour les classes de trafic doit atteindre les valeurs ME à l'essai de plaque suivantes pour les graves non traités ou les mélanges traités aux liants hydrauliques :

- T1  $\geq 80$  MN/m<sup>2</sup> (classe de trafic pondéral **très léger**)
- T2  $\geq 100$  MN/m<sup>2</sup> (classe de trafic pondéral **léger**)



## Armatures, matériaux combinés tels que les géotextiles, plattelages ou autres

Si les caractéristiques du matériau sont insuffisantes et si un remplacement est exclu pour différentes raisons, il est possible de recourir à des moyens auxiliaires. L'augmentation de la portance, la filtration et la protection contre la contamination sont des applications courantes.

### Augmentation et égalisation de la portance (armature)

Les granulats transmettent principalement les forces de compression. Si l'on introduit des éléments qui reprennent également les forces de tension, la stabilité de l'agrégat s'en trouve améliorée. C'est un effet que l'on peut comparer à l'armature du béton. Les tensions sont réparties également sur la surface. Dans la construction forestière, on utilise principalement :

- Des géotextiles pour égaliser la portance du sous-sol (fonction d'armature)
- Un plattelage sous les fondations (même fonction qu'un caillebotis)
- Des fascines (réparti les forces et draine simultanément)

### Amélioration de la fonction de filtre

Lors de la percolation de l'eau dans les granulats, les parties fines peuvent être entraînées et de déposer dans d'autres couches. Il se forme ainsi de nouvelles cavités dans le matériau qui amoindrissent la portance. Ce phénomène dépend de la granularité respective des deux couches voisines. Plus la fraction fine des deux couches est différente, plus le phénomène est important (par exemple des drainages avec du gravier dans une pente limoneuse). Si un tel phénomène est suspecté, il est possible d'empaqueter le gravier de drainage dans un voile non-tissé pour éviter la contamination par les fines des terrains. Bien entendu, il est possible qu'avec le temps le voile non-tissé se colmate. Il est conseillé de faire des essais ou de se renseigner sur l'évolution des ouvrages réalisés dans des conditions similaires.

### Eviter la contamination

Les propriétés d'un granulat se modifient lorsqu'il est contaminé par les terrains avoisinants. Ce phénomène est accéléré par la circulation (cycles de compression-décompression) lors de conditions défavorables ou de la mise en place de matériaux sur une plateforme inadéquate. Les ornières peuvent être réparées, mais la couche de fondation devient de plus en plus hétérogène et sensible aux sollicitations. La contamination peut être évitée en posant une couche de séparation sous les granulats de fondation. Il existe des géotextiles spéciaux à cet effet qui vont empêcher la contamination des couches de fondation par un sous sol inadéquat (fonction de séparation, géotextiles combinés de tissés et non-tissés).



## Graves non traitées, normées, au départ gravière.

Les graves non traitées sont en général des mélanges de sable et graviers normés résultant de l'exploitation industrielle de matériaux meubles naturels ou de matériaux recyclés. Elles sont utilisées en génie civil et construction routière. Les exigences relatives à ces graves sont précisées dans la norme SN 670119-NA.

Les exigences géométriques, physiques et chimiques sont les principaux critères de différenciation. Les graves non traitées sont produites en 3 catégories : les graves 0/16, 0/22.4 et 0/45. Les catégories se différencient par les passants au tamis, c'est-à-dire à la courbe granulométrique et au refus le plus gros (voir ci-dessous). Pour une grave 0/16 et une grave 0/22.4 le grain le plus gros toléré est entre 16 et 32 mm, respectivement entre 22.4 et 45 mm. Pour la grave 0/45 le grain le plus gros toléré se situe entre 45 et 90 mm. Pour les 3 catégories, la fraction fine (passant < 0.063 mm) est limitée à 3% (12% si la grave est certifiée non gélive). Le test utilisé est celui du CBR : la force nécessaire à un poinçon pour pénétrer à une certaine profondeur est mesurée. Ce test est coûteux et long.

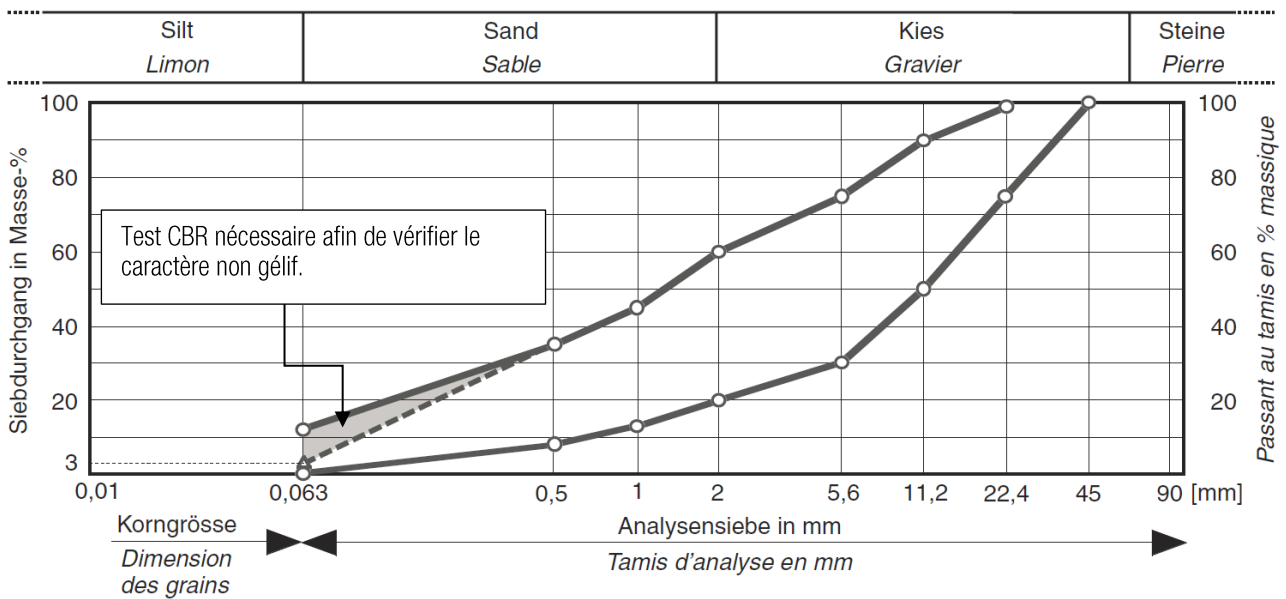


Illustration 48 Tolérance granulométrique pour une grave non traitée 0/22.4 (SN 670 119 NA).

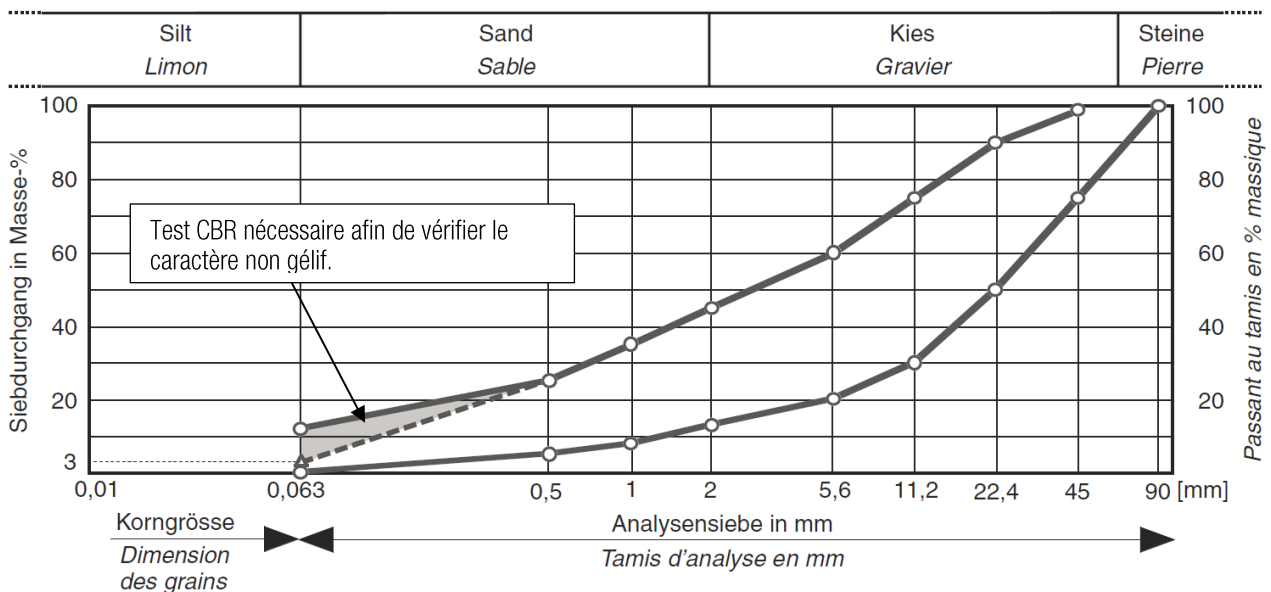


Illustration 49 Tolérance granulométrique d'une grave non traitée 0/45 (SN 670 119 NA).



En plus de la granulométrie et de la fraction fine, les graves non traitées (GNT) doivent répondre à des critères de compactibilité (essai de Proctor), de dureté des granulats (Test de Los Angeles) et la forme des granulats (coefficient d'aplatissement). Les critères sont identiques pour les GNT 0/16, 0/22.4 et 0/45.

La mise en oeuvre de graves non traitées normées pour le génie civil et la construction de routes (principalement pour les couches de fondations et les couches portantes) est usuelle aujourd'hui. Par la normalisation des graves, il est possible d'obtenir un matériau de qualité qui garantit en même temps les exigences de stabilité, de sécurité d'utilisation et de durabilité dans la construction routière. L'assurance qualité des GNT doit être menée par le fabricant, respectivement par le fournisseur, au travers d'un contrôle primaire - le contrôle des processus de production - et enfin par une déclaration de conformité et un certificat de produit.

De manière générale la production des graves les plus fines (GNT 0/16 et 0/22.4) est plus compliquée que pour une 0/45. Le coût plus élevé est justifié par une qualité géotechnique plus favorable. En effet une GNT 0/22.4 a, par rapport à une GNT 0/45, une meilleure portance (valeur de portance de 0.11 par rapport à 0.7 pour 0/45) et exige en principe une épaisseur de couche de fondation moindre. Indépendamment de ce fait, le dimensionnement d'une couche de fondation doit toujours tenir compte de l'effet du gel.

Dans la construction routière classique, une couche de fondation GNT 0/45 est utilisée, car elle remplit normalement les exigences concernant la compactibilité, la portance, la stabilité et l'économie de manière idéale. En cas de renouvellement du revêtement ou lors d'une mise en oeuvre difficile, il est parfois nécessaire de régler la planie avec de la grave 0/22.4 voire même avec de la grave 0/16

Pour les routes à faible trafic pondéral, typiquement pour les routes forestières, les exigences sont encore réduites. L'emploi de graves non traitées normées n'est souvent pas nécessaire techniquement ou justifié du point de vue économique. Une stabilisation des matériaux en place ou la préparation de matériaux locaux pour la superstructure d'une route forestière constituent des alternatives adéquates et moins onéreuses. Toutefois, les graves normées sont utilisées dans la construction forestière parce qu'elles garantissent contractuellement la qualité et l'homogénéité des matériaux. Ainsi, par exemple, les questions de garanties légales lors de la pose d'un revêtement sur une fondation en graves non normée sont évitées.



## Utilisation de matériaux recyclés en forêt

### Classification des matériaux recyclés

#### Provenance des matériaux et traitement

Une déconstruction ordonnée lors de la démolition d'un bâtiment fait partie des obligations du constructeur de nos jours (Loi sur la protection de la nature (LPN), Loi sur la protection des eaux (LPE)). Il s'agit principalement de valoriser les déchets de chantier en les traitant et en les réutilisant afin de ménager les ressources naturelles et de protéger l'environnement. Un cycle des matières est visé (voir illustration 50) en respectant les systèmes considérés. Les matériaux résultant de la démolition du béton doivent être réutilisés dans la fabrication de béton. De même, les déchets d'asphalte sont réutilisés dans la production d'asphaltes.

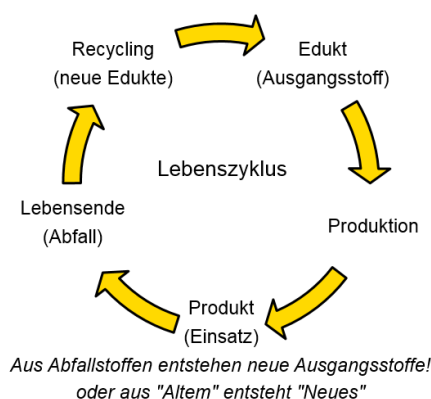


Illustration 50 Cycle idéal de la matière (ANU GR)

L'Ordonnance sur les travaux de construction (OTConst) et l'Ordonnance sur les déchets (OLED) prescrivent en outre les points suivants :

- Dépollution, art. 60 OTConst, détection des polluants, protection des travailleurs et élimination des polluants en particulier l'amiante (obligation d'annonce).
- Tri des déchets en 6 catégories (art. 17 OLED)
  - o Matériaux terreux [horizons A, B],
  - o Excavation et percement [horizon C et rocher],
  - o Matériaux bitumineux et minéraux, bétons, tuiles et plâtres de bâtiments,
  - o Autres matériaux à valoriser [métal, bois, verre, plastique],
  - o Déchets combustibles sans valorisation matière possible,
  - o Autres
- Interdiction du mélange ou de dilution, art. 9 OLED
- Obligation générale de valoriser selon l'état de la technique, art. 12 OLED.

En ce qui concerne la construction de routes forestière et rurale, seuls les **déchets minéraux provenant de la démolition d'ouvrages construits** sont d'intérêt. Ceux-ci sont classés de nouveau en 6 catégories (art. 20 OLED) :

- Matériaux bitumineux de démolition non liés (teneur en hydrocarbures aromatiques polycycliques [HAP]  $\leq$  250 mg/kg)
- Matériaux bitumineux de démolition sous forme liée (teneur en HAP  $\geq$  250 mg/kg)
- Matériaux non bitumineux de démolition des routes (non traités ou stabilisés aux liants hydrauliques)
- Tessons de tuiles
- Bétons de démolition (avec ou sans armature)
- Matériaux de démolition non triés (béton, brique, briques silico-calcaire, pierre naturelles)

Etant donné que les déchets de chantiers sont issus de bâtiments construits à des époques diverses, leur composition est très diverse. Des matières novatrices à l'époque sont aujourd'hui déconsidérées voire interdites pour de multiples raisons. Pour des raisons de protection de la santé humaine, de la protection des eaux et des sols, ils doivent être retirés du cycle des matières. Dans les matériaux minéraux, il s'agit pour l'essentiel de l'amiante utilisé dans les colles pour carrelage, dans l'isolation et dans certains mortiers, des biphényles polychlorés (PCB) utilisés comme plastifiants dans les mastics et les HAP utilisés comme liants dans les peintures, les enrobés et les scories d'UIOM.



Ces 6 catégories de déchets de démolition doivent être en principe transportés dans une déchèterie (ou site d'une entreprise spécialisée) afin d'y être traités et préparés. Ainsi des matériaux de construction secondaires normés qui ne contiennent plus de substances polluantes sont mis sur le marché (tableau 7). Leur classification doit correspondre à la norme (SN 670 119 NA) ou sont éventuellement incorporés dans d'autres produits.

Concernant les dénominations et les exigences de composition, les normes SN présentent de légères différences avec la Directive de l'OFEV 31/06. Dans l'optique de la construction forestière et rurale, ces différences sont marginales. En pratique, c'est la directive fédérale qui fait foi. Les matériaux bitumineux de démolition présentant une teneur en HAP > 249 mg/kg constituent une exception : selon les circonstances ils sont aujourd'hui soit recyclés ou mis en décharge (décharge de type E selon l'OLED), ceci jusqu'en 2025. Passé ce délai, ces matériaux bitumineux pourront être/seront valorisés thermiquement.

Un recyclage direct sur place sans le passage par une décharge exige un certificat de qualité de la part du maître de l'œuvre. Cette certification intervient dans le cadre du permis de construire et doit satisfaire aux exigences de la directive de l'OFEV 31/06.

Tableau 7 matériaux de démolition minéraux (colonne 1), matériaux secondaires (RC-graves selon SN 670 119 NA) (colonne 2) et exemples d'applications (colonne 3)



Illustration 51 agrégats d'enrobé



Illustration 52 RC-grave de granulats asphalte (HAP  $\leq$  250 mg/kg)



Illustration 53 par exemple AC F



Illustration 54 matériaux non bitumineux de route (fondation)



Illustration 55 RC-grave P (A ou B)



Illustration 56 RC-grave P



Illustration 57 béton de démolition



Illustration 58 RC- granulat à béton



Illustration 59 Béton recyclé



Illustration 60 Démolition diverse



Illustration 61 RC-grave non triée



Illustration 62 RC-Granulat non triés en sous-bassement.



Illustration 63 Tuiles de démolition



Illustration 64 RC-granulat de tuiles



Illustration 65 RC-Granulat de tuiles dans l'aménagement extérieur

L'utilisation de matériaux de construction secondaires est importante. Les entrepreneurs innovants développent toujours plus de matériaux secondaires répondants à des exigences élevées. Par principe, tout producteur de déchets devrait n'utiliser que des matériaux recyclés. Les pouvoirs publics se doivent d'endosser le rôle de modèle.

## Utilisations courantes et limitations dans la construction forestière et rurale

Les méthodes de procéder dans la démolition sont également valables pour les ouvrages forestiers. L'illustration 66 décrit plus concrètement la manière de procéder adéquate.





→ **Matériaux minéraux**

Asphalt ( **Test HAP ou labo** )

- Fondation, couche de fermeture liée
- Recyclage des granulats puis RC (entrep. spéc.)
- Décharge (HAP > 20'000 mg/kg dans le liant)

Dégrappage de route (fondation)

- Réemploi sur place autorisé
- Recyclage et triage en RC-Grave P (A et B) (entrep. spéc.)
- Décharge inerte (propre type A)

Béton de démolition

Granulats à béton (entreprises spécialisées)

Démolition non triée

Granulats mélangés (")

Tuiles

Granulats de tuiles (")

→ **Déchets de chantier**

Bois de démolition

Plastique

Métal

Verre

- Recyclage dans les filières

→ **Non récupérable, combustible**

UIOM

Illustration 66 Méthodes de démolition

Les matériaux utilisés en fondation et couche de fermeture dans les routes forestières sont en majorité naturels. Pourtant ils appartiennent à la catégorie des matériaux inertes. Lors de travaux de renaturation totale (enlèvement complet) ou d'élargissement d'un tracé existant, ils ne peuvent, en principe, être réutilisés directement que dans le cadre d'un projet de construction soumis à autorisation.

De même, l'utilisation de produits recyclés dans la construction forestière est soumise à un examen. L'utilisation de béton recyclé pour la fondation de regards ou en guise de béton d'enrobage pour les aqueducs répond à toutes les exigences de qualité, sauf la résistance au gel. Selon l'OFEV, en raison de la protection de l'environnement (directive 31/06) les restrictions suivantes (Tableau 7) sont formulées pour les produits utilisés en génie civil :

Matériaux de récupération	Mise en œuvre sous forme non liée		Mise en œuvre sous forme liée	
	sans revêtement	avec revêtement	aux liants hydrauliques	aux liants bitumineux
Granulat bitumineux	*	**		
Grave de recyclage P				
Grave de recyclage A				
Grave de recyclage B				
Granulat de béton				
Granulat non trié				

	Utilisation admise
**	Utilisation avec restriction: possible uniquement pour des planies sous un revêtement bitumineux
	Utilisation interdite
*	Utilisation possible à condition que la couche ne dépasse pas 7 cm d'épaisseur et que le granulat bitumineux soit laminé

Tableau 7 Extrait de la publication 31/06, OFEV, Utilisation des matériaux recyclés

Il ressort du tableau 7 qu'une distinction est faite entre la mise en œuvre sous forme non liée ou sous forme liée ainsi que la pose consécutive d'une couche de fermeture ou non. Une couche de fermeture est formée d'un matériau liant (asphalte, béton) étanche qui empêche la percolation de l'eau météorique dans la couche portante de recyclé. Ceci pour des raisons de protection de l'eau.

De manière générale les graves RC ne doivent pas être utilisées (Association Suisse de Recyclage (ASR), 2012) :

- Dans les zones S1, S2, S3 de Protection des eaux
- Pour le drainage



- En contact direct avec la nappe phréatique (en règle générale il faut respecter une distance de 2 m)
- Epaisseur maximale de la couche 2 m (excepté les RC graves P)
- Pour les levées et remblais, comblements de fouilles, remplissages (excepté les RC graves P)

**Les prescriptions cantonales sont parfois plus sévères.** Les règlements concernant l'utilisation des matériaux recyclés sont généralement du ressort des services de l'environnement. Ceux-ci émettent des directives ou des lignes directrices qui lient l'administration.

#### Utilisation sans couche de fermeture (Selon directive OFEV)

Pour les fondations et les remblais les RC-graves P (primaire) et RC-graves B (béton) sont autorisées.

Le dégrappage d'asphalte, fréquemment utilisé jusqu'ici comme couche d'usure sur une fondation non liante, est aujourd'hui interdit. Il est toutefois encore possible d'utiliser un granulats d'asphalte (max 7 cm d'épaisseur roulé)<sup>3</sup>. Cependant la mise en œuvre est difficile : il faut de bonnes conditions de chaleur et humidité pour compacter et réactiver ce qui reste de liant.

Exemples d'utilisation dans la construction forestière :

- Petits remblais (RC-graves P, peu de sens en forêt)
- Fondation (RC-graves P)
- Couche d'usure (RC-graves P et B, granulats d'asphalte (max. 7cm, mise en œuvre et compactage selon les règles)
- Remplissage (RC-graves P, peu de sens en forêt)

#### Utilisation avec couche de fermeture (selon directive OFEV)

Si une couche de fermeture liante est prévue, cinq des six matériaux recyclés sont utilisables sans restriction. Seuls les granulats d'asphalte en planie, sous la couche en béton bitumineux sont interdits. Selon la même directive, les matériaux de couche d'usure étanches sont les revêtements d'asphalte (béton bitumineux) ou les bétons à prise hydraulique. Les traitements de surface (gravillonnages mono- ou bicouches ainsi que la stabilisation au ciment) ne sont pas considérés comme des revêtements durablement étanches.

Exemples d'utilisation dans la construction forestière :

- Remblais (RC-graves P)
- Remblais < 2 m (toutes les catégories de graves, sauf les granulats d'asphalte seulement en couche de réglage (planie) sous un revêtement bitumineux)
- Fondation toutes les catégories de graves, sauf les granulats d'asphalte (seulement en couche de réglage (planie) sous un revêtement bitumineux).

#### Utilisation des graves liantes (selon directive OFEV)

Les graves recyclées peuvent être utilisées comme les graves primaires comme granulats liés par du bitume ou par du ciment. Afin de préserver les qualités du matériau et de se réserver la possibilité d'un nouveau cycle de recyclage, les recyclés bitumineux (RC-graves A, granulats d'asphalte) doivent être liés par du bitume et les produits de recyclage « gris » (RC-graves B, granulats à béton, granulats mélangés) hydrauliquement (ciment).

Exemples d'utilisation dans la construction forestière :

- Fondation (toutes, avec le liant adéquat)
- Couche de fermeture (seul le bitume est adapté)

## Limite des caractéristiques techniques des matériaux recyclés

Il est normal qu'un matériau déjà utilisé montre des signes d'usure et de transformation de la matière. Le nouvel emploi doit pourtant remplir les exigences demandées. Pour les matériaux minéraux recyclés il s'agit de distinguer les caractéristiques des granulats de celles du liant.

### Problèmes dus aux caractéristiques du granulats

#### RC-graves B

Lors d'un emploi en matériaux secondaire lié, la composition peut varier considérablement. Un béton recyclé n'est jamais aussi résistant qu'un béton à partir de matériaux primaires. Un grain recyclé ne présente qu'un tiers de la résistance d'un grain primaire de bonne qualité. De plus, un granulats de béton recyclé contient du ciment, si bien que lors d'une deuxième préparation, la teneur en ciment ainsi que les ions alcalins s'accumulent. Le risque de réaction alcali-granulats (RAG) s'accroît alors considérablement. Pour des éléments de

---

<sup>3</sup> Certains cantons sont plus restrictifs : VD n'admet plus les granulats d'asphalte non recouverts par une couche de fermeture liante de 7 cm roulée. VD admet par contre une fondation en granulats non triés pour autant qu'elle soit recouverte par 10 cm de grave naturelle.



construction fortement sollicités, le béton recyclé n'est pas employé. Selon la directive SIA 2030 les applications des classes d'exposition XC1, XC2, XC3 et XC4 sont permises.

#### RC-graves mélangées

Les tuiles, briques et briques silico-calcaire sont les composantes des granulats mélangés. Au contact de l'humidité ces matériaux se dégradent assez rapidement en raison des mouvements de la matière avec la teneur en eau variable et l'effet du gel. De plus, les grains peuvent se disloquer pendant le compactage. Si ces matériaux peuvent suffire pour une place de jeu ou de sport, ils ne sont pas recommandables dans la construction routière. Les bétons à partir de graves mélangées bougent plus, sont moins stables dimensionnellement et présentent une résistance moindre au fléchissement que les bétons à partir de matériaux primaires.

#### Influence du liant

##### Bitume

Les granulats d'asphalte peuvent, sous l'influence de l'eau, perdre des substances polluantes comme des phénols ou des HAP. De tels granulats ne doivent pas être employés sans une couche de protection étanche, même s'ils sont mis en place de manière irréprochable. Avec l'usure normale, ces granulats finissent tôt ou tard dans la nature.

##### Ciment

Risque élevé de RAG (double) lors de l'utilisation en soubassement humide pour le ciment Portland (CEM I). Le béton de RC graves mélangées n'est pas indiqué si la résistance au gel et aux sels de déneigement est une nécessité (KBOB 2009). Pas d'exposition XF.

#### Dégâts probables

Baisse de la qualité, atteintes aux eaux, dégâts dus au gel croissants, difficulté à recycler à nouveau.

#### Conséquences pour l'utilisation en forêt

Pour la construction sur les chemins forestiers, il est avantageux de disposer d'un projet de construction à proximité générant des excavations importantes susceptible de fournir des matériaux meubles adéquats, c'est-à-dire des matériaux primaires à préparer localement en lieu et place de graves de recyclage. Il s'agit en fait d'une valorisation des matériaux de la construction dans le sens de l'idée du recyclage. Dans la même veine, les transports sont minimaux et on évite l'importation de matériaux étrangers au milieu local. Les matériaux secondaires de qualité tels les asphaltes recyclés pour la couche de finition ou le béton recyclés ont leur place en forêt si cela devait s'avérer nécessaire, faisable techniquement et autorisé.



## Matériaux meubles selon SN 670 009a et leurs aptitudes géotechniques

Groupe	Sous-groupe	Symbole	Description	Qualité mat.
Dépôts gravitaires et produits d'altération	Dépôt d'éboulement et d'éroulement	Bs	Amas de matériau d'éboulement ou d'éroulement de versants rocheux accumulés en pied de versant et de paroi avec blocs de taille décimétrique à métrique; en général anguleux	++
	Eboulis	Hs	Amas de débris rocheux accumulés en pied de paroi par chute d'éléments isolés; éléments principalement de taille centrimétrique à métrique croissant du haut en bas de la pente; en général anguleux	++
	Colluvion limon de pente	Co	Matériau déposé par l'eau de ruissellement en surface d'un versant; dépôt peu structuré; dominance granulométrique des limons et sables avec une présence de matière organique diffuse fréquente	--
	Eluvion	El	Produit de la désagrégation des roches, en général fin et resté sur place	--
Dépôts fluviatiles	Dépôt fluviatile grossier	Af	Matériau généralement grossier (en prédominance graviers et sables) déposés dans le lit d'une rivière; granulats arrondis à bien arrondis.	+
	Dépôt torrentiel, dépôt de lave torrentielle	At	Matériau de granulométrie moyenne à grossière déposé par forte crue le long d'un torrent ou en forme de cône dans sa partie inférieure; granulats subanguleux à arrondis	"+" (selon teneur en matériaux fins)
	Dépôts d'inondation	Ai	Dépôts limoneux à graveleux déposés par débordement d'une rivière dans une plaine	"-" à "+" selon les matériaux rencontrés
Dépôts lacustres	Sédiments lacustre de fond	Al	Sédiments déposés au fond d'un lac: prédominance argileuse à sable fin: souvent varvés; consolidation normale; de faible compacité, respectivement de consistance très molle à ferme	--
	Dépôt deltaïque et dépôt de littoral	Ad	Matériau granulaire, en général granoclassé de la classe granulométrique des sables et des graviers, déposé à l'embouchure d'un cours d'eau dans un lac; ou en bordure d'un lac	"+" à "++" selon teneur en mat. fins
	Craie lacustre	K	Précipitation hydrochimique et dépôts de restes fossilisés du plancton lacustre dans les eaux riches en carbonate de calcium	---
Dépôts glaciaires et périglaciaires	Moraines - frontale - latérale - superficielle	M	Matériau déposé par un glacier au front de la langue glaciaire, latéralement ou sur place lors de son retrait; mal gradué; matériau de taille, de forme, de compacité et de consistance variables	"-" à "+", mesures in situ indispensables
	Moraine de fond	Mf	Matériau trainé et broyé sous un glacier et compacté; en général surconsolidé; mal gradué; les matériaux grossiers apparaissent souvent dans une matrice d'argile limono-sableuse; non statifié; présence d'éléments striés	"++" à "+++" selon les cas
	Alluvion fluvioglaciaire	Ag	Matériau morainique étalé et délavé par les eau de fonte d'un glacier; stratification lenticulaire et éléments anguleux à subarrondis	"+" en l'absence de
	Sédiments glaciolacustre, moraine aquatique	As	Matériau morainique déposé dans des lacs périglaciaires ou déposé directement sous l'eau par le glacier; en général fin à sableux avec quelques graviers fins subarrondis; souvent varvés; d'une compacité très lâche à moyenne, respectivement de consistance très molle à ferme	-
Dépôts anthropiques	Remblai, remblayage	R	Dépôt d'origine anthropique non pollués ou avec peu de matériaux d'origine anthropique tels que débris de tuiles, béton, gypse, métal, etc.	-
	Décharge	De	Dépôt d'origine anthropique contenant beaucoup de déchets tels que déchets de chantier, mâchefers, ordures ménagères, etc.	---
Sols organiques	Couche supérieure (pédologie: couche A)	A	Couche superficielle du sol, riche en humus, de couleur sombre, généralement densément colonisé par les racines	---
	Sous-couche (pédologie: couche B)	B	Sous-couche ou couche de transition issue de l'altération de la roche mère, structurée (en agrégats) avec des traces ostensibles d'activité biologique (racines, galeries de vers de terre)	--
	Dépôt marécageux, tourbe, paléosol	P	Matériau généralement fin à sableux riche en matière organique décomposée ou pas décomposée (fibreuse); généralement de couleur foncée	---
Divers	Loess	L	Dépôts non stratifiés de limons et sables fins d'origine éolienne	--
	Tuf calcaire	Tk	Précipité de carbonate de calcium au droit de venue d'eau bicarbonatée	"-" à "+" selon les cas



## Sources

Association suisse de déconstruction, triage et recyclage (Editeur), 2012. Règlement d'assurance-qualité de l'ASR pour les granulats et graves recyclés, Edition 2012. ASR, Kloten. 16p.

Byland H. 2013. Handbuch für Verkehrswegebau-Poliere. Campus Sursee. Sursee, 153S.

OFEV (Hrsg.), 2006: Directive pour la valorisation des déchets de chantier minéraux. Environnement pratique No. 0631. Office fédéral de l'environnement, Bern. 34p.

Dietrich K., Casanova A., Düggele Ph., Hofer M. 1986. Strassenbau. Institut für Verkehrsplanung, Transporttechnik, Strassen- und Eisenbahnbau, ETH Zürich, Zürich. 118S.

Figi H. 2010. Stützmauern im Gebirge, Tiefbauamt Graubünden, Chur, 10S.

Geo-Bau-Labor 2011: Ungebundene Gemische und rezyklierte Gesteinskörnungen als Fundationsmaterial im Ingenieur- und Strassenbau Neue bzw aktualisierte Norm SN 670119a-NA (ab 01.02.2010); Eigenschaften, Anforderungen, Qualitätssicherung, Deklaration (V 2.3, 03/2011)

Hirt R. 2001. Kiessande für Güter- und Waldstrassen; in Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik 10/2001. Schweizerischer Verein für Vermessung und Kulturtechnik (SVVK), Zürich. 4S.

KBOB (Hrsg.), 2009. Beton aus Recycelter Gesteinskörnung, Empfehlung 2007/2. Koordination der Bau- und Liegenschaftsorgane des Bundes, Bern. 6S.

Labhart T.P. 2009: Geologie der Schweiz. Ott, Bern. 211S.

Lang H-J., Huder J., Ammann P., Puzrin A.M., 2010. Bodenmechanik und Grundbau, Springer, Heidelberg, 336S.

Pfiffner O.A. 2010. Geologie der Alpen, Haupt, Bern. 400S.

Schweizerische Geotechnische Kommission (Hrsg.) 1997. Die Mineralischen Rohstoffe der Schweiz, Schweizerische geotechnische Kommission, Zürich. 536S.

Swisstopo 2015: Geologische Karten der Schweiz

Stiftung Umwelt-Einsatz Schweiz (SUS) 2013. Trockenmauern, Haupt, Bern. 470S.

Witt K.J. (Hrsg.) 2008. Grundbau – Taschenbuch, Teil 1 Geotechnische Grundlagen, Ernst und Sohn, Berlin. 814S.

Normes	Association suisse des professionnels de la route et des transport (VSS)	
	SN 640 324	SN 670 004-1b
	SN 640 575	SN 670 009
	SN 640 581a	SN 670 119-NA
	SN 640 585	SN 670 125a
	SN 640 740	SN 670 140b
	SN 640 741	

Articles Normés Centre suisse d'études pour la rationalisation de la construction (CRB)

NPK 211 323	NPK 211.813
NPK 211.611	NPK 221.111
NPK 211.614	NPK 221.112
NPK 211.621	NPK 237 812
NPK 211.711	NPK 237 826

<http://www.hkl-baumaschinen.de/HKL-MIETPARK-Magazin/Ausgabe-1/HKL-Bautipp-Verdichtung/Verdichtungsgebiete>