

3 - Granulats, origines et caractéristiques : [23]

3-1 Introduction

On appelle granulats un ensemble de grains d'origine minérale, de dimensions comprises entre 0 et 80 mm, provenant de roches meubles, massives, de minerais ou de leurs transformations thermiques et de sous-produits de l'industrie.

Le tableau **3.1** donne une idée plus précise de cette définition.

Le domaine d'application des granulats peut aider à leur définition :

— utilisés liés avec du ciment ou du bitume, ils représentent 80 à 90 % des mortiers et bétons hydrauliques destinés au bâtiment et ouvrages d'art, mais aussi des enrobés et graves traitées destinés aux assises de chaussées et des voies ferroviaires ;

— utilisés non liés, ils représentent 100 % des drains, des filtres et de certaines assises.

Pour certains auteurs il faut y ajouter les matériaux extraits de roches massives ou meubles et mis en œuvre tels quels (tout-venant) pour faire des remblais, par exemple. En fait, ces matériaux représentent le domaine distinct des terrassements avec ses aspects particuliers : extractions, traitements en général en place, compactage, stabilité, méthodes d'études particulières, etc.

Ce qui va distinguer le granulats du tout-venant, c'est l'aspect préparation après extraction qui en fait un produit industriel répondant à des critères dimensionnels, physico-mécaniques et chimiques très stricts :

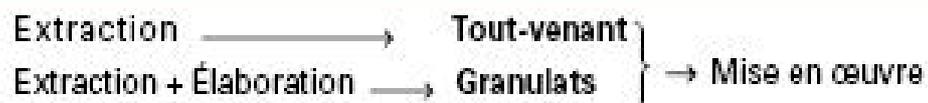


Tableau 3.1 Granulats. Origines et caractéristiques

Tableau A – Origine des principaux granulats utilisés				
Roches d'origine	Transformations			Usages
	aucune	concassage criblage	thermiques	
Argiles			Argiles expansées	Mortiers Bétons hydrauliques Graves traitées ou non Enrobés Enduits. Clous Ballasts Filtres Drains
Limons	Tout-venant	Fines Sables Gravillons Cailloux Ballasts	Verres expansés	
Sables				
Graviers				
Pouzzolanes				
Roches massives			Schistes expansés	
Minerais		Barytine	Laitiers	
Autres origines : démolition de bâtiments et de chaussées		Fines, sables, gravillons, etc.		

(1) Ces granulats représentent plus de 90 % de la production.

Tableau B – Définition des différents types de granulats		
Fines	0/D	avec $D \leq 0,080$ mm
Sables	0/D	avec $D \leq 6,3$ mm
Gravillons	d/D	avec $d \geq 1$ mm et $D \leq 31,5$ mm
Cailloux	d/D	avec $d \geq 20$ mm et $D \leq 80$ mm
Graves	0/D	avec $6,3 < D \leq 80$ mm
Ballasts	d/D concassé	avec $d \geq 25$ mm et $D \leq 50$ mm

Les granulats sont classés suivant leur granularité, qui est la distribution dimensionnelle de leurs grains, ce qui conduit aux appellations normalisées du tableau B où D et d représentent respectivement la plus grande et la plus petite dimension du granulat avec des conditions de refus à D et de tamisat à d comprises entre 1 et 15 %.

Les granulats sont dits naturels lorsqu'ils sont extraits de leur site géologique d'origine et artificiels dans les autres cas ; ils sont dits légers lorsque leur masse volumique réelle pr est inférieure à 2 g/cm³, courants si pr est comprise entre 2 et 3 g/cm³ et lourds au-delà de 3 g/cm³.

Il s'agit là d'un chiffre moyen et assez stable couvrant les quinze dernières années. Cela représente 6 t/an par habitant, ce qui est caractéristique des pays industrialisés dans le monde.

Granulats, origines et caractéristiques

Après l'extraction des sables et graviers alluvionnaires (sablères, gravières, ballastières) et l'abattage à l'explosif des roches massives comme les granites, les calcaires, etc. (carrières), le tout-venant est criblé, ou criblé et concassé pour constituer les granulats.

Les granulats les plus couramment utilisés dans le bâtiment et le génie civil ont une masse volumique réelle comprise entre 2 et 3 Mg/m³.

Les normes européennes ont remplacé les normes françaises en juin 2004, concrétisant ainsi quinze ans de normalisation des granulats en Europe. Plusieurs nouveautés ont sensiblement modifié les habitudes mais se sont avérées sans incidence notable sur les bétons hydrauliques et les produits routiers : le remplacement des tamis à toile tissée par des tamis à tôle perforée à trous carrés pour les dimensions supérieures ou égales à 4 mm, la détermination des fines au tamis de 0,063 mm au lieu du tamis de 0,080 mm, etc.

3.2. Principales ressources

3.2.1 Origine des roches

L'homme exerce ses activités sur la partie solide la plus superficielle de l'écorce terrestre. Mis à part les rares surfaces où la roche saine affleure, il rencontre toujours dans la nature la même succession verticale : terre arable en surface, sur une profondeur de 0 à 1 m, zone altérée meuble en dessous, de 0 à 30 m, et roches saines en profondeur qui peuvent être meubles (argiles, sables, etc.) ou massives (calcaires, granites, etc.) (Figure 3.1).

Cette distinction entre roches meubles et massives est importante sur le plan technologique, mais elle ne coïncide pas avec leur genèse.

À l'origine du globe terrestre, qui se chiffre en milliards d'années, il s'est formé, par refroidissement en surface du magma en fusion, des silicoaluminates de potassium, sodium, calcium, magnésium et fer (pour ne citer que les principaux). Coordonnés par l'oxygène, qui représente en volume 98 % de cette matière, ces éléments s'associent pour constituer les minéraux.

Selon la composition chimique des magmas d'origine, il s'est formé des associations minéralogiques différentes, que l'on appelle roches magmatiques, et qui peuvent être schématisées par les deux extrêmes que sont les granites riches en silice, K et Na, et les gabbros, plus pauvres en silice et plus riches en Ca, Fe et Mg.

En général, ces roches sont massives, sauf le cas de certaines projections volcaniques (cendres, pouzzolanes, etc.) qui sont parfois meubles.

L'apparition de l'eau et d'événements climatiques semblables à ceux qui existent actuellement a entraîné une évolution de surface de ces roches (ou altération) : dissolution,

Granulats, origines et caractéristiques

désagrégation, transport et dépôt (ou sédimentation) dans les lits des rivières, les lacs, les mers de sables, graviers, argiles, vases et boues riches en calcium.

D'autres minéraux se forment dans ces nouvelles conditions : argiles, carbonates comme la calcite ou la dolomite, etc.

Le développement de la vie végétale (1 milliard d'années ?) introduit la sédimentation d'un élément nouveau, le carbone, qui est à l'origine des charbons et pétroles.

Ces roches sédimentaires meubles peuvent se consolider par précipitation chimique de la silice et du calcium, et parfois du magnésium dissous, et donner les grès, calcaires, dolomies, etc.

La transformation de ces roches magmatiques et sédimentaires sous l'action de contraintes σ et de températures θ élevées conduit aux roches métamorphiques. Elles sont caractérisées par un feuilletage ou une schistosité dus aux contraintes orientées (schistes, ardoises, etc.) et par une recristallisation due à ces deux facteurs (σ , θ) (micaschistes, gneiss). Il peut y avoir schistosité sans recristallisation, comme pour les ardoises, ou recristallisation sans feuilletage (cornéennes).

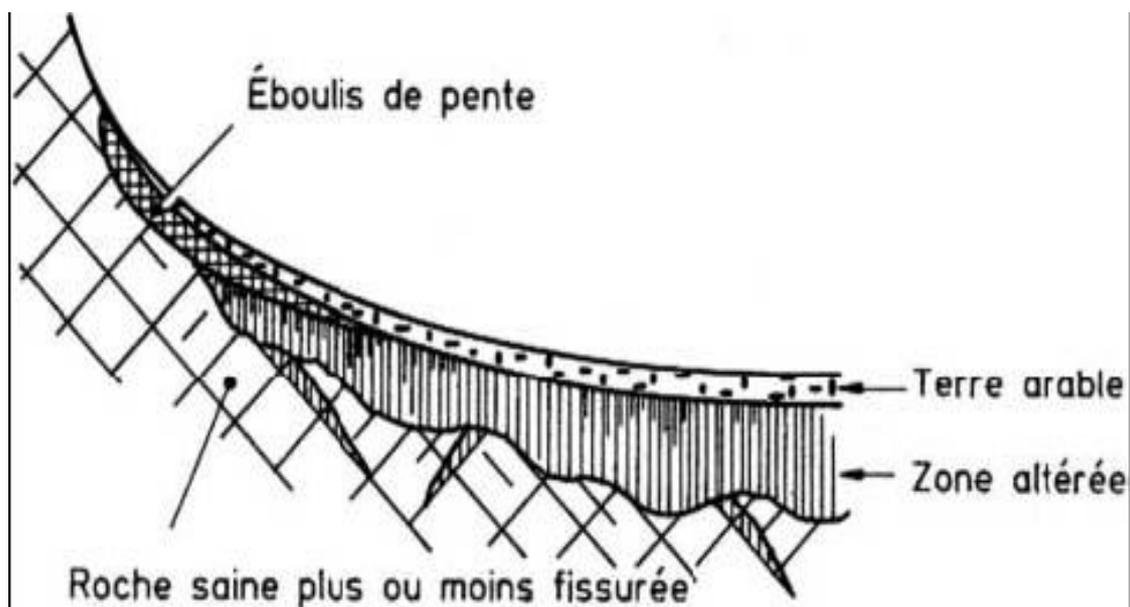


Figure 3.1 – Coupe classique des cinquante premiers mètres de l'écorce terrestre

La notion d'intermédiaire est omniprésente en géologie :

— entre les compositions chimiques extrêmes des magmas, tous les termes de passage existent, conduisant à des compositions minéralogiques variées :

granites → granodiorites → diorites → gabbrodiorites → gabbros

Granulats, origines et caractéristiques

— entre les modes de dépôts, d'alimentation et de cimentation des roches sédimentaires, tous les intermédiaires existent :

calcaires→calcaires dolomitiques→dolomies

calcaires→calcaires gréseux→grès →quartzites

calcaires→calcaires argileux→marnes →argiles

— ainsi qu'entre les modes de transformation des roches métamorphiques :

sables argileux→schistes→schistes tachetés →cornéennes

Toutes ces roches sont soumises aux altérations météoriques et alimentent la formation des sédiments, elles peuvent être soumises à l'action du métamorphisme. Cela montre toute la complexité de l'origine des roches qui peut être schématisée dans la (figure 3.2).

Si l'on ajoute à cela les perturbations mécaniques dues aux déformations de l'écorce terrestre (plissements, fissurations ou diaclases, failles), on comprendra qu'il est en général difficile de définir la géométrie d'un gisement sans le secours de la géologie.

Les granulats peuvent être naturels, artificiels ou recyclés.

Les granulats naturels sont des grains minéraux qui proviennent de roches massives ou meubles n'ayant subi aucune transformation autre que mécanique.

Les granulats artificiels sont des grains minéraux qui résultent d'un procédé industriel comprenant des transformations thermiques ou autres.

Les granulats recyclés sont obtenus par traitement d'une matière inorganique précédemment utilisée dans la construction.

3.2.2 Granulats naturels

Les roches exploitées pour la production de granulats naturels sont des roches massives d'origine éruptive ou sédimentaire, constituées de minéraux fortement liés entre eux, et des roches meubles d'origine sédimentaire, formées d'éléments détritiques non consolidés.

3.2.3 Minéraux

Ce sont les constituants des roches ; ils conditionnent donc, dans une large mesure, leurs propriétés.

Le quartz (SiO₂) est le minéral le plus fréquent, en particulier dans les sables marins et alluvionnaires, dans les grès, les quartzites et les schistes.

Il est inaltérable, dur et résistant.

Il pose des problèmes d'adhésivité avec les liants hydrocarbonés que l'on sait résoudre par dopage des surfaces. Il peut conduire à des inconvénients à terme (5 à 30 ans suivant le climat) lorsqu'il présente une grande surface spécifique ou que son réseau cristallin a été

déformé : dans les milieux basiques des bétons hydrauliques, il participera au développement de gels gonflants (phénomènes de réactions alcalis-silice).

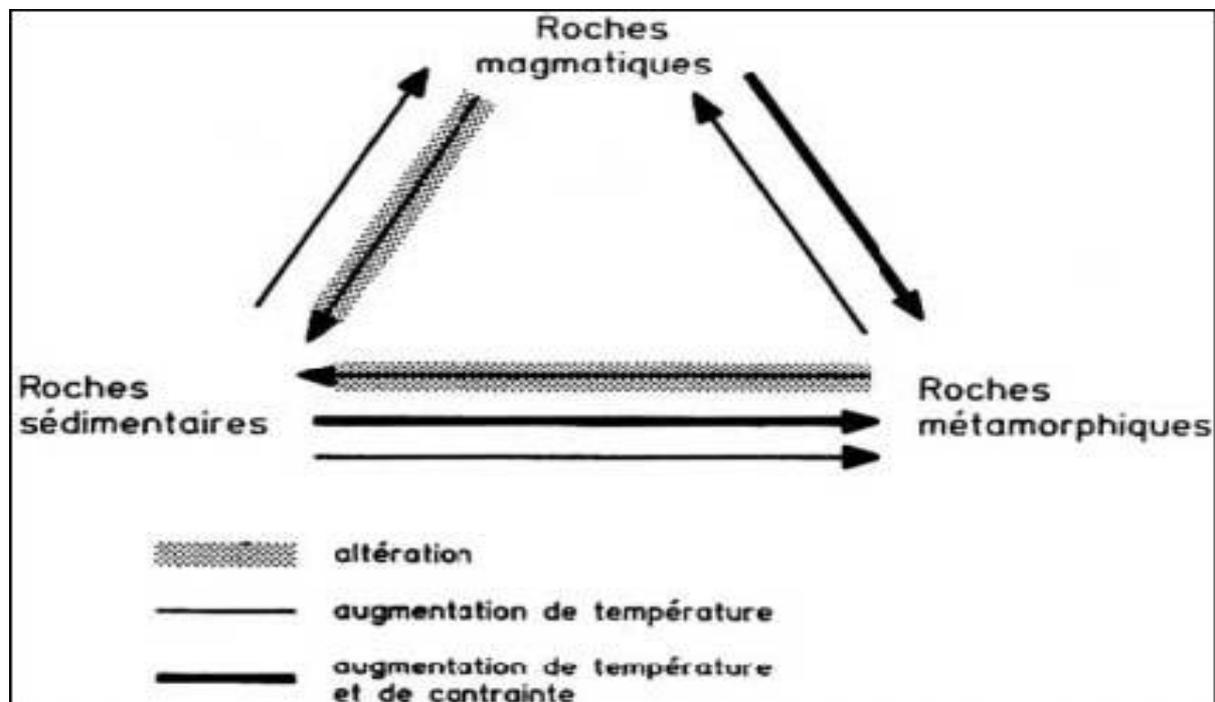


Figure 3.2 – Transformations des roches

C'est un minéral dur, donc favorable pour maintenir la rugosité de surface des chaussées, favorable comme agent abrasif, mais qui, en contrepartie, usera rapidement les engins de terrassement, d'extraction, de foration, de criblage et de concassage.

Les feldspaths (silicates d'alumine avec K, Na et Ca) sont surtout abondants dans les roches magmatiques et métamorphiques.

Lorsqu'ils ne sont pas altérés, ou qu'ils ont subi une altération hydrothermale, ils ne posent pas de problèmes particuliers. Par contre, l'altération météorique a pu détruire en partie leur réseau cristallin, avec un développement d'argiles plus ou moins nocives susceptibles de polluer les sables de concassage ou la surface des gravillons et de nuire à l'adhésivité des liants.

Les micas (silicates d'alumine avec Mg et K), présents dans la plupart des roches magmatiques et métamorphiques, ont une forme lamellaire et sont très tendres. Ils sont gênants par leur forme et leur faible cohésion interfoliaire peu favorable à l'adhésion des liants.

Granulats, origines et caractéristiques

Mais ce n'est qu'au-delà de 10 % qu'ils sont néfastes, et s'ils sont de grande taille (millimétrique).

Les argiles, très proches des micas, s'en distinguent par leur petite taille (micrométrique) et leur aptitude à fixer de l'eau.

On les trouve dans toutes les roches sédimentaires et leur présence est surtout gênante dans les sables, où elles entraînent des diminutions de résistance en présence de liants hydrauliques et une sensibilité à l'eau, à long terme, avec les liants hydrocarbonés.

À la surface des plus gros éléments, elles font écran vis-à-vis de tous les liants. Dans le cas d'utilisation sans liants, elles favorisent les déformations.

Les autres silicates, surtout présents dans les roches magmatiques et métamorphiques, sont très stables (silicates de métamorphisme) ou ont un rôle peu connu (pyroxènes, amphiboles, péridots).

Il est évident que leur état d'altération météorique, comme pour les feldspaths, est le point le plus important.

Les carbonates, parmi lesquels la calcite (CaCO_3) est la plus commune, sont assez tendres et très stables et s'associent très bien aux liants (liaison épitaxiale avec le ciment, par exemple). La calcite constitue l'essentiel des calcaires, avec une substitution fréquente de Ca par Mg (calcaires magnésiens, calcaires dolomitiques, dolomies) qui conduit à un minéral plus dur et un peu plus abrasif : la dolomite.

Le gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), très tendre et assez soluble dans l'eau, est présent dans certaines roches sédimentaires de pays secs. Les réactions qu'il provoque avec les ciments (formation d'ettringite gonflante) sont à éviter. L'anhydrite (CaSO_4) pose les mêmes problèmes.

La pyrite (FeS_2), parfois présente dans certaines roches métamorphiques et alluvionnaires, est un minéral instable : oxydation facile laissant des traînées de rouille sur les façades en bétons, formation d'ettringite gonflante avec les ciments, attaque acide des parties métalliques des ouvrages.

Sur le plan mécanique, les minéraux peuvent être classés en trois groupes :

- durs et résistants : quartz et silicates de métamorphisme ;
- résistants et moyennement durs : feldspaths et silicates ferromagnésiens ;
- tendres et moyennement résistants : carbonates et micas.

On verra dans le tableau 3-2 les répercussions que cela entraîne sur les propriétés des roches.

3.2.4 Roches massives

Ce sont des assemblages de minéraux ; elles ont donc, en général, des propriétés en partie liées à celles des minéraux. Mais l'assemblage est rarement parfait du fait de la présence de vides.

Ces vides sont parfois grossièrement sphériques (pores) et dus au dégazage des roches magmatiques (basaltes vacuolaires, pouzzolanes) ou à une cimentation incomplète des roches sédimentaires (grès, calcaires poreux). Ils se présentent parfois sous forme de fissures très fines dues à des contraintes d'origine thermique ou mécanique et peuvent, dans ce cas, affecter toutes les roches. Pores et fissures conduisent à des diminutions de résistance, de même lorsque les cristaux deviennent plus gros (millimétriques ou plus).

Une autre particularité est aussi défavorable vis-à-vis de la résistance et surtout de la production d'éléments plats au concassage :

C'est l'anisotropie de la roche due à une orientation privilégiée de certains minéraux (micas par exemple) ou à une disposition en lits alternés de minéraux différents.

Enfin, l'état d'altération des silicates autres que le quartz entraîne, en général, une diminution de la qualité. Ces tendances sont indiquées dans le tableau 1.

Les figures 3.3 et 3.4 et le tableau 3.2 classent les roches massives les plus exploitées en France en fonction de leur composition minéralogique et de leur structure.

Tableau 3.2 influence des caractéristiques des roches sur leur propriétés [23]

Tableau 1 – Influence des caractéristiques des roches sur leurs propriétés						
Caractéristiques	Propriétés					
	Résistance				Abrasiveité	Forme (1)
	à la compression	à l'usure	au polissage	au gel		
Gros grain	moyenne	moyenne	forte		forte	bonne
Grain fin	forte	forte	faible		moyenne	mauvaise
Porosité	faible	faible	forte	faible	forte	bonne
Fissuration	moyenne	moyenne	moyenne	moyenne	moyenne	
Anisotropie	moyenne	moyenne	forte	moyenne	moyenne	mauvaise
Minéraux durs ou durs et tendres	forte	forte	forte		forte	moyenne
Minéraux tendres	moyenne	faible	faible		faible	bonne
Altération	faible	moyenne	forte	moyenne	forte	bonne

(1) On dit que les grains ont une bonne forme lorsqu'ils tendent vers la forme sphérique.

Tableau 2 – Roches métamorphiques				
Roches dues à l'influence de la température	schiste	schiste tacheté	cornéenne	grain fin
Composition minéralogique	quartz + micas	quartz + micas	quartz + feldspaths	
	quartz + feldspaths + micas	quartz + feldspaths	quartz + amphibole	
Roches dues à l'influence de la température et de la pression	gneiss	leptynite	amphibolite	gros grain

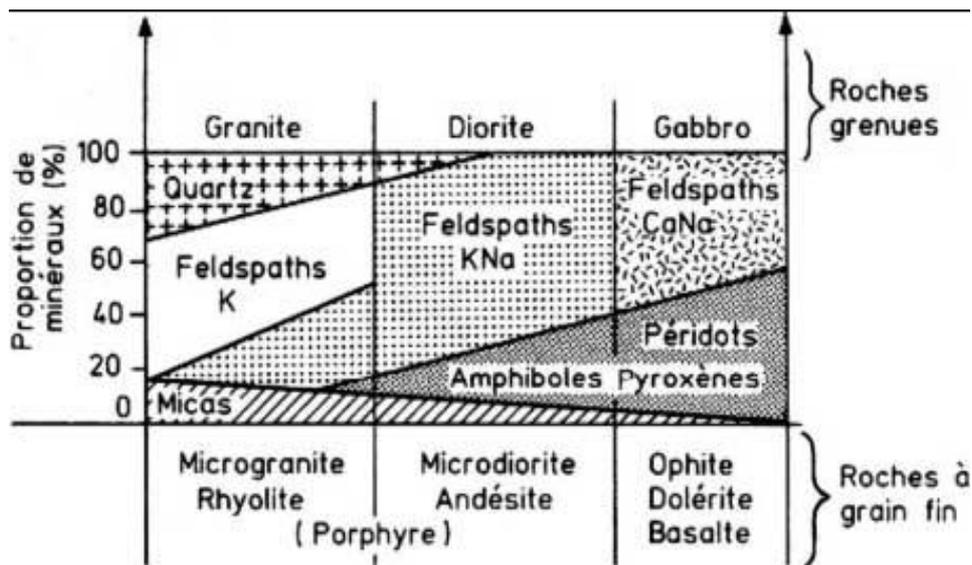
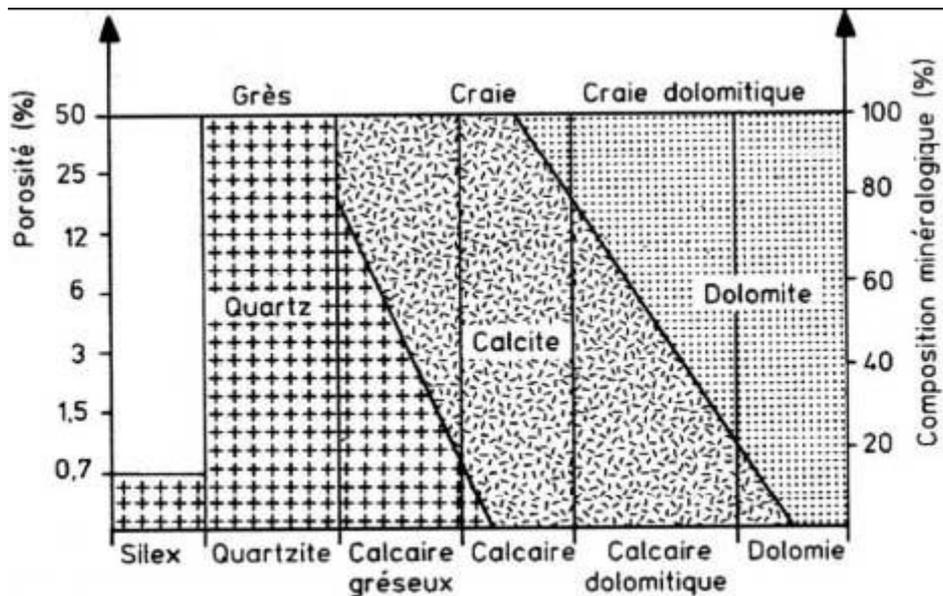


Figure 3.3 – Roches magmatiques



Exemple : une roche contenant 50 % de calcite et 50 % de dolomite est un calcaire dolomitique. Si sa porosité est très élevée, on a affaire à une craie dolomitique (ou à un calcaire dolomitique grossier).

Figure 3.4- Roches sédimentaires

Granulats, origines et caractéristiques

Les gisements de roches magmatiques se présentent sous la forme de masses importantes enracinées en profondeur (roches plutoniques), leur extension en surface est en général plus limitée qu'en profondeur. Les coulées de laves ont une extension en surface variable, avec un enracinement assez réduit (roches volcaniques).

Ces roches sont toujours parcourues de fissures (diaclasses), parfois de failles, qui sont des cheminements privilégiés pour l'altération météorique, source de pollution argileuse.

Les roches sédimentaires massives se présentent toujours en bancs de quelques mètres à quelques dizaines de mètres d'épaisseur, horizontaux lors de leur dépôt, mais qui ont pu être perturbés lors des déformations de l'écorce terrestre jusqu'à se trouver verticaux. Ces déformations et des phénomènes de retrait lors de leur passage de l'état meuble à l'état massif font qu'elles sont parcourues de cassures (diaclasses) souvent remplies d'argiles.

Les roches métamorphiques se présentent en bancs d'épaisseur et d'orientation variables qui peuvent, pour les termes de passage aux roches magmatiques, s'enraciner en profondeur. Elles sont aussi parcourues de diaclasses.

- Granulats de roches massives éruptives

Deux familles de roches massives éruptives sont classiquement distinguées : les roches magmatiques et les roches métamorphiques.

■ Les roches magmatiques sont issues des profondeurs de l'écorce terrestre. Elles résultent du refroidissement d'un magma. Deux types de roches sont ainsi différenciés : les roches plutoniques et les roches volcaniques.

Les roches plutoniques proviennent d'un refroidissement lent du magma, piégé par l'écorce terrestre. Elles ont affleuré à la surface de l'écorce terrestre par suite de mouvements tectoniques ou de l'érosion des formations sus-jacentes. Elles se caractérisent par leur structure grenue, où les minéraux sont largement développés et bien visibles à l'œil nu (granites, diorites, gabbros, etc.).

Les roches volcaniques proviennent d'un refroidissement rapide du magma, qui s'est épanché et solidifié à la surface de l'écorce terrestre sous forme par exemple de coulées de lave. Elles se caractérisent par leur structure fluidale, microlitique voire vitreuse, où la plupart des minéraux n'ont pas eu le temps de se développer et sont de ce fait invisibles à l'œil nu (rhyolites, andésites, basaltes, etc.).

■ Les roches métamorphiques résultent, quant à elles, de la transformation des roches superficielles sous l'effet d'une élévation de la température et/ou de la pression, au fur et à mesure de leur enfouissement en profondeur par l'action de phénomènes multiples et complexes. Elles ont été remontées à la surface de l'écorce terrestre par des mouvements de

Granulats, origines et caractéristiques

soulèvement de grande ampleur. Elles se caractérisent par une orientation plus ou moins marquée de certains minéraux, voire par une structure feuilletée (gneiss, leptynites, amphibolites, quartzites, cornéennes, etc.).

Les granulats ayant pour origine les roches éruptives conviennent généralement bien à la confection des bétons hydrauliques et à l'exécution des travaux de viabilité courants. Beaucoup sont les constituants de choix des techniques routières et plus particulièrement de celles destinées aux couches de roulement. Certains peuvent être utilisés pour la réalisation du ballast des voies ferrées.

-Granulats de roches massives sédimentaires

Les roches massives sédimentaires se sont formées à la surface des continents et au fond des océans. Elles englobent notamment les roches siliceuses et les roches carbonatées.

Les roches siliceuses, d'origine principalement détritique, proviennent de la cimentation des grains d'un sable (grès à grès quartzeux voire quartzitiques, selon le degré de remplissage des vides laissés entre les grains par la silice qui les lie, etc.). Leur résistance dépend essentiellement de leur porosité.

Les roches carbonatées ont une origine organo-chimique : origine organique par l'accumulation de débris de coquilles ou l'activité coloniale de coraux, origine chimique par la précipitation des carbonates qui constituent généralement le ciment. Les structures peuvent être très variées, suivant la dimension, la forme et la proportion des coquilles, l'importance du ciment, le pourcentage des autres minéraux et des pores (calcaires, calcaires dolomitiques, etc.).

Leur résistance est conditionnée en grande partie par leur porosité.

Les roches massives calcaires affleurent dans les bassins sédimentaires (bassin Parisien, bassin Aquitain) et les chaînes plissées récentes (chaîne alpine, chaîne pyrénéenne).

Les granulats calcaires satisfont aux exigences techniques de la demande courante : bétons hydrauliques et viabilité. La plupart donnent de bons matériaux routiers mais leur emploi pour la réalisation des revêtements de chaussées reste limité parce qu'ils sont sensibles au polissage et cela d'autant plus que leur pâte est plus fine et que leur pureté est plus grande.

3.2.5 Roches meubles

Elles sont constituées de fragments de roches massives décrites ci-avant, sauf pour les plus petits éléments (< 1 mm) qui sont souvent monocristallins (quartz, feldspaths).

Les seules roches meubles d'origine magmatique exploitées en France sont les pouzzolanes, roches volcanosédimentaires accumulées lors des éruptions volcaniques (chaîne des Puys, par

Granulats, origines et caractéristiques

exemple), et plus rares, les ponces, terme extrême du dégazage volcanique, blanches et de masse volumique $\rho < 1 \text{ g/cm}^3$.

Les pouzzolanes sont constituées d'éléments scoriacés compris entre 0 et 10 mm formés de verre englobant de rares cristaux de feldspaths, de silicates ferromagnésiens et de 20 à 50 % de bulles d'air bien visibles à l'oeil nu. Toutes les autres roches meubles exploitées sont d'origine sédimentaire ; on peut distinguer :

- les dépôts alluviaux, les plus importants en tonnages extraits (95 %), exploités dans les lits vifs des rivières (sables et graviers, en général propres), dans les basses vallées (sables et graviers légèrement pollués par des argiles, c'est la source la plus importante) et dans les terrasses alluviales, en général plus polluées et contenant souvent des éléments altérés ;
- les dépôts alluviaux immergés exploités en mer (sables et graviers) ;
- les dépôts laissés par les glaciers ou moraines (argiles, sables, cailloux et blocs) ;
- les dépôts formés par l'action du gel et de la gravité : éboulis de pentes (argiles, sables, cailloux et blocs) ;
- les dépôts sableux repris par le vent : dunes (sables, sables fins) ;
- les formations sableuses déposées en mer : sables, sables fins.

Le quartz est très largement dominant dans ces formations, les feldspaths sont présents dans les zones amont des rivières, ainsi que la calcite dans les régions où existent en abondance des niveaux calcaires.

Mis à part les formations marines qui se présentent en couches régulières et souvent homogènes, tous les autres dépôts sont hétérogènes en granularité et en épaisseur, et contiennent souvent des lentilles argileuses de dimensions très variables. L'hétérogénéité granulaire de ces formations nécessite de connaître ces variations qui ont une influence sur les modalités de l'extraction.

Tableau 3.3 objectifs et possibilités des méthodes de prospection.

Tableau 3 – Objectifs et possibilités des méthodes de prospection			
	Méthodes	Roches massives	Roches meubles
Phase 2	Prospection électrique	Épaisseur de la découverte (zones faillées)	Épaisseur de la découverte
	Trainée de résistivité	Méthode plus précise	Méthode plus précise
	Magnétotellurique artificielle Sismique réfraction	Épaisseur de la découverte	Épaisseur de la découverte si le substratum est massif
	Ces méthodes rapides servent à implanter judicieusement les sondages.		
Phase 3	Sondages carottés Sondages destructifs (vitesse de foration)	Épaisseur ponctuelle de la découverte Calage pour les sondages destructifs Qualité du matériau, essais sur éclats	
	Tarière Pelle hydraulique pour les alluvions		Épaisseur ponctuelle de la découverte et du gisement, qualité du matériau, granularité (1), cartes topographiques précises : surface du sol, toit matériau exploitable et isopaques de la découverte, toit substratum et isopaques du matériau exploitable
Phase 4	Diagraphies : radioactivité naturelle, résistivité	Précisions sur la structure des gisements	Pollution argileuse et structure des gisements
(1) La connaissance des variations de granularités dans l'espace est fondamentale pour les roches meubles car elle conditionne les modalités de l'extraction si l'on veut obtenir une granularité homogène.			

-Granulats de roches meubles

Les roches meubles sont des dépôts détritiques qui n'ont pas été cimentés. Elles résultent d'un ensemble de processus d'érosion et de sédimentation.

■ Elles sont surtout exploitées le long des fleuves et de leurs affluents : les villes se sont créées et agrandies au voisinage de l'eau, dans les vallées. Ainsi, les alluvions constituent généralement les matériaux de construction traditionnels les plus proches ; ce sont aussi les plus faciles à extraire. Par ailleurs, la diversité des sédiments (composition pétrographique, granularité, etc.), lorsqu'ils existent et subsistent, permet de répondre à la quasi-totalité de la demande.

La proximité des lieux de consommation, le large éventail des qualités offertes, les coûts de production modérés par suite du travail de préconcassage, précriblage et pré lavage effectué durant les phases géologiques de dépôt, expliquent le développement important de l'exploitation des matériaux alluvionnaires et la place prépondérante qu'ils occupent dans le marché des granulats.

Le renforcement de la législation sur les carrières et sur la protection des ressources en eau, l'épuisement de certains gisements, la concurrence au niveau de l'occupation des sols, la spéculation foncière, la sensibilisation de plus en plus marquée de l'opinion publique aux

Granulats, origines et caractéristiques

problèmes liés à l'environnement, toutes ces contraintes concourent à limiter l'extension des zones d'extraction, voire à interdire l'ouverture de nouvelles exploitations.

■ Des matériaux alluvionnaires sont également extraits en mer, sur la plate-forme continentale à l'embouchure des fleuves. Il s'agit d'alluvions fluviatiles anciennes correspondant à des terrasses alluviales continentales qui ont été submergées. Les gisements exploitables renferment principalement des sables, de compositions pétrographiques et de granularités très variées (de sables quartzeux purs aux sables coquilliers purs, avec tous les intermédiaires possibles).

Les réserves en granulats marins sont considérables, mais leur exploitation intensive pose des problèmes écologiques, économiques et techniques.

■ Des sables fins non alluvionnaires sont aussi employés comme granulats. Ils proviennent de dépôts détritiques anciens, qui ont été brassés par des courants marins puis recouverts par d'autres formations sédimentaires à la suite de variations successives des conditions paléogéographiques, et qui se retrouvent actuellement émergés sur des étendues et des épaisseurs variables.

De plus, quelques autres matériaux détritiques sont ponctuellement exploités. Il s'agit principalement de dépôts soit résiduels, soit très peu transportés donc souvent mal classés (arènes granitiques, moraines fluvio-glaciaires, éboulis de pente, etc.).

Granulats artificiels ou recyclés

Divers types de granulats artificiels ou recyclés s'avèrent en outre potentiellement utilisables, plus particulièrement en technique routière, sous réserve de résultats d'études préalables probants. La politique actuellement menée en matière d'environnement tend à favoriser le développement de leur emploi, dans le respect des règles environnementales et techniques visant à minimiser les risques de pollutions et de désordres.

Les granulats artificiels peuvent être des coproduits de l'industrie sidérurgique (laitiers de haut fourneau refroidis à l'air, laitiers d'aciérie issus d'un four à arc électrique, etc.), des coproduits de l'industrie minière (schistes houillers, etc.), voire des mâchefers d'incinération d'ordures ménagères.

Les granulats recyclés résultent de la déconstruction d'ouvrages du bâtiment et du génie civil (matériaux de démolition et agrégats d'enrobés essentiellement).

À côté des granulats naturels issus des roches, et qui représentent l'essentiel de la production, il existe d'autres granulats qui proviennent de la transformation thermique de roches, de coproduits, de déchets ou d'anciens ouvrages.

Granulats, origines et caractéristiques

D'origine artificielle, les matériaux expansés par action thermique d'argiles, schistes, laitiers, cendres volantes. Leur masse volumique $\rho < 1 \text{ g/cm}^3$ les rend intéressants pour les bétons légers, mais en contrepartie leur forte porosité entraîne souvent une absorption d'eau (10 à 15 %) dont il faut toujours tenir compte pour cet usage.

Le traitement thermique de minerais d'aluminium (bauxite) conduit à la fabrication de bauxite calcinée (1 600 °C) utilisée comme granulats antidérapant. Au-delà de 2 000 °C, il se forme du corindon (alumine Al_2O_3) donnant des granulats très durs et abrasifs.

Les laitiers sont essentiellement des coproduits de la fabrication de la fonte et des aciers. Ces produits, refroidis en fosse, donnent une roche plus ou moins vacuolaire formée de silicates d'alumine calciques voisins des feldspaths. Les sous-produits d'aciéries sont en général plus denses et plus résistants, mais présentent un risque de présence de chaux instable lorsque le produit élaboré est récent.

Les laitiers concassés ont les mêmes usages que les granulats naturels.

Le laitier granulé refroidi en présence d'eau doit être considéré plus comme un liant hydraulique que comme un granulats.

Le concassage d'anciennes chaussées en bétons, en enrobés, ou de friches industrielles bâtiments, essentiellement conduit à des granulats dont l'utilisation se développe progressivement. L'emploi de bétons concassés non pollués pour faire un autre béton ne pose pas de problème. Les friches industrielles sont beaucoup plus hétérogènes (mélange de bétons, terres cuites, céramiques, plâtres, etc.) et nécessitent des traitements particuliers et un contrôle plus poussé des granulats produits. Les enrobés ne sont retraités que pour être régénérés.

3.3 Exploitation des gisements

3.3.1 Extraction

L'objectif principal est d'amener dans l'usine de préparation la plus forte proportion possible de matériaux sains.

Pour les gisements meubles hors d'eau, il faut enlever la partie superficielle ou découverte, réserver les terres arables et éliminer les parties altérées. Cela s'effectue avec une décapeuse automotrice qui peut en assurer le transport sur 1 km environ, ou avec une pelle associée à des tombereaux.

Si le gisement est immergé, l'extraction se fera à l'aide d'une drague à godets, à grappins ou d'une drague suceuse. Ce dernier dispositif est le plus efficace pour les gisements en mer.

Les mêmes matériels servent pour extraire la partie saine du matériau.

Le choix de plusieurs points d'extractions simultanés est important pour obtenir la granularité désirée par mélange.

Le transport se fait en général par bandes transporteuses.

Pour les roches massives, la découverte est éliminée à l'aide d'une pelle hydraulique.

Ici, l'abattage à l'explosif est nécessaire pour fragmenter au maximum le matériau et éviter les trop gros blocs qui ne pourraient être admis directement dans le premier concasseur (ou débiteur).

Après formation, suivant un schéma adapté à la structure du gisement, mise en place de l'explosif et utilisation de microretards pour limiter les ébranlements (nuisance pour l'environnement), le matériau est réduit en un 0/2 000 mm par abattage de 10 000 à 50 000 t. Repris à la pelle à câble ou hydraulique, ou à l'aide d'une chargeuse à pneus, il est déversé sur le premier élément de la chaîne d'élaboration (grille de scalpage ou débiteur).

3.3.2 Élaboration des granulats

Après abattage ou extraction, le tout-venant va subir trois types de transformations : le criblage, le concassage et le lavage.

Le criblage est commun à toutes les installations quel que soit le type de roche exploitée. Cette fonction de classement est fondamentale puisqu'elle va devenir les produits marchands tels que : fines, sables, gravillons, ballasts et graves et leur dénomination précise comme : sable 0/2 ou gravillon 6,3/10.

Pour les roches massives, un aspect particulier du criblage est l'élimination de 0/D qui se pratique en amont (grille de scalpage à barres parallèles) ou après le débiteur (crible à mailles carrées), ou les deux dans le but d'éliminer le maximum de produits argileux.

Pour les roches meubles, il y a souvent un écrêtage des plus gros éléments inutilisables tels quels. Le criblage se fait, en général, sur des cribles vibrants à une ou plusieurs toiles à mailles carrées.

Deux pièges sont à éviter dans le criblage :

- le sous-dimensionnement des cribles (ou la suralimentation), l'utilisation d'alimentateurs spéciaux permet de limiter ce défaut ;
- l'alimentation par des matériaux pollués (ou à teneur en eau élevée pour les plus petites coupures).

Dans les deux cas, la dimension de la coupure diminue et, donc, n'est plus celle recherchée. Cela se traduit par un produit plus fin et une plus forte proportion de déclassés à cette dimension. Il faut garder présent à l'esprit que la granularité, et surtout sa constance durant tout un chantier, est la propriété la plus importante.

Granulats, origines et caractéristiques

Les granularités produites doivent se situer à l'intérieur d'un fuseau assez étroit pour garantir un niveau de qualité suffisant (figure 3.5).

L'obtention d'une granularité homogène est facilitée par la séparation en classes granulaires (2 ou 3) qui seront ensuite recomposées.

Le concassage, obligatoire pour les roches massives, n'interviendra pour les alluvions que pour corriger la granularité ou pour utiliser les éléments supérieurs à 40 mm et en faire des granulats pour assises de chaussées qui exigent une certaine proportion de concassés.

Le rôle du concassage est de réduire les dimensions des éléments pour obtenir la granularité souhaitée et, accessoirement, pour améliorer leur forme.

Les concasseurs sont basés sur trois principes :

- rupture par écrasement entre deux pièces métalliques, dont l'une est mobile par translation (mâchoires) ou par rotation (giratoires) ;
- rupture par chocs contre des pièces mobiles en rotation (marteaux, percussions, soles tournantes) ;

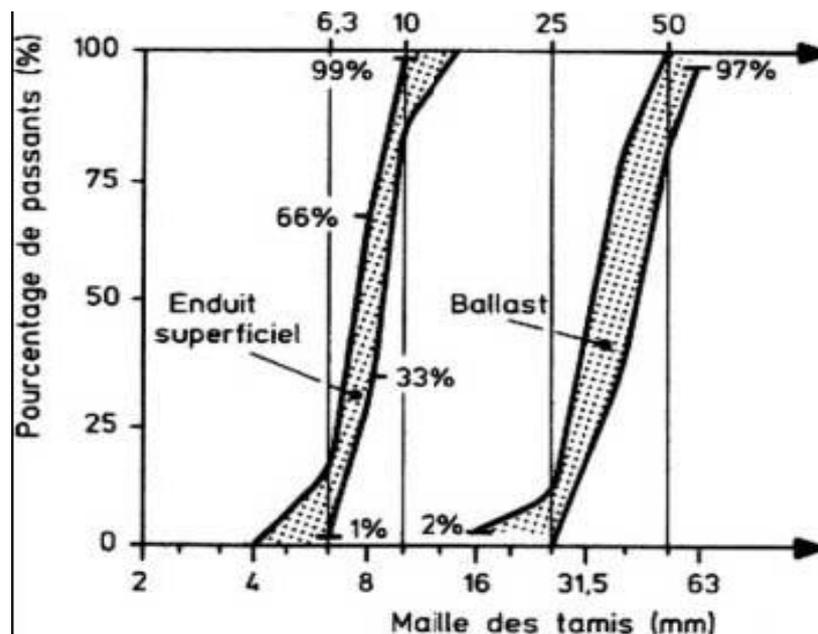


Figure 3.5 – Exemple de fuseaux de spécifications. [23]

- rupture sous l'action de charges libres (boulets, barres).

La granularité produite par un concasseur dépend :

- de la granularité des produits d'entrée ;
- du débit d'alimentation ;
- de l'usure des pièces broyantes.

La figure 3.6 donne un schéma classique d'installation simple. Les parties M et C sont caractéristiques des installations de roches massives et les parties A, ou A et C, sont communes pour les alluvions.

Le couplage concasseur-crible est un ensemble complexe qui se trouve encore compliqué par d'éventuels recyclages des plus gros éléments. On comprend alors que l'art du carrier n'est pas un vain mot, et que les asservissements qui commencent à se développer ne sont que le début d'une longue évolution qui conduira un jour à l'automatisation de ces fonctionnements. Elle seule pourra garantir une meilleure fiabilité des produits.

Le lavage, omniprésent dans les gisements de roches alluvionnaires où l'eau ne manque pas, est soit une exception en roche massive (débouillage en amont du débiteur), soit utilisé pour débarrasser les gravillons de leurs fines de surface.

Le lavage des alluvions se fait en partie naturellement par l'extraction sous eau, mais il permet aussi une classification des sables en réalisant des séparations, impossibles à effectuer par criblage classique, entre 10 et 150 μm .

Les modes de traitements utilisent des courants d'eau entraînant, par gravité, par centrifugation, par courants de surface ou ascendants, ou par vibrations, la séparation sable-eau polluée.

Les eaux de lavage nécessitent une récupération (bassins de décantation), voire un traitement pour concentrer les boues afin qu'elles occupent moins de place.

Les fonctions annexes assurent les liaisons entre les appareils, la mise en stock et l'expédition. Les flux de matériaux sont assurés par les bandes transporteuses, les régulations d'alimentation par des alimentateurs doseurs.

La mise en stock (silos, trémies, stocks au sol), souhaitable après le débiteur pour créer une réserve de fonctionnement, est obligatoire pour les produits finis.

Le dépoussiérage se justifie pour des raisons de santé du personnel, d'environnement et pour éviter les dommages aux matériels.

3.3.3 Carrières et environnement

Les granulats sont des matériaux dont on ne saurait se passer et cette notion est trop souvent oubliée du grand public, qui ne ressent l'impact des carrières qu'à travers les atteintes qu'elles apportent à l'environnement.

Les granulats sont des matériaux bon marché, et le développement des contraintes au niveau de leur production ne peut qu'entraîner un renchérissement des produits.

L'exploitation des carrières ne conduit pas à terme, comme beaucoup de gens semblent le croire, à une stérilisation d'une surface qui peut être considérable. Ce n'est qu'un épisode de

Granulats, origines et caractéristiques

l'occupation du sol qui se conclut, à plus ou moins long terme, par une nouvelle affectation dont bénéficie la collectivité : bases de loisirs, espaces sportifs, bassins de pêche, terres agricoles, opérations d'urbanisme, bassins d'alimentation en eau, colonisations biotopiques, aménagement paysager, stockage contrôlé de déchets.

Les actions envisageables sur la réduction des nuisances, associées aux multiples possibilités de réaménagement, montrent que la carrière n'a qu'un effet nuisible temporaire et réductible qui, à moyen et longs termes, sera toujours bénéfique pour la collectivité.

3.4. Utilisation des granulats

3.4.1 Utilisations courantes

Mis à part les drains, où l'on s'intéresse à une propriété de transfert de l'eau à travers les granulats en recherchant un assemblage granulaire à forte porosité, toutes les autres utilisations tendent au contraire à concevoir des assemblages granulaires à faible porosité et donc à forte compacité. Les objectifs recherchés sont ici certaines caractéristiques mécaniques : module de déformation élevé pour les granulats non liés et résistance à la traction élevée pour les granulats liés. L'obtention de cette compacité est due à trois facteurs : la granularité, le compactage, l'adjonction de liant.

La granularité conditionne la porosité du mélange. Si tous les grains avaient la même dimension, on aurait une porosité maximale de 30 %, s'ils étaient répartis suivant une courbe discontinue, on aurait une porosité minimale de 3 %. Mais on ne sait pas les arranger d'une façon optimale et il n'est pas économique de réaliser une telle granularité. On va donc se trouver avec des granularités continues telles qu'elles existent dans la nature ou telles que les produisent les concasseurs qui, en se rapprochant des courbes de Talbot (figure 2.20) conduisent, sur le plan pratique, aux plus grandes compacités.

Le compactage est obligatoire pour toutes les techniques utilisant des graves, traitées ou non, pour les assises de chaussées et a pour but d'améliorer la mise en place des éléments, et donc la compacité. Cette opération s'effectue toujours à teneur en eau optimale.

À noter qu'une roche trop tendre risque de voir sa granularité évoluer au compactage, ce qui amènerait le mélange vers une courbe trop sableuse et donc moins dense. Dans ce cas, il faut savoir choisir une granularité plus grenue (courbe plus creuse) pour qu'elle soit optimale après compactage.

Pour les bétons hydrauliques, l'obtention, avant prise, d'un mélange très plastique rend la phase de compactage moins importante ; l'utilisation de vibrations a plus pour rôle le remplissage parfait des coffrages.

L'adjonction de liant vient contribuer à la granularité, mais surtout apporter au mélange des forces de liaisons intergranulaires qui accroissent sa résistance à la traction.

La granularité est donc, dans tous les cas, le paramètre fondamental.

Elle se détermine après lavage sous eau, par tamisage à sec, entre 80 μm et 80 mm. En dessous de 80 μm la loi de Stokes est largement utilisée.

La résistance mécanique des granulats, tant qu'elle reste supérieure ou égale à celle du composite que l'on réalise, ne joue aucun rôle, sauf d'entraîner une évolution au compactage,

ou si le composite est soumis à une action mécanique d'usure ou de choc (couches de surface des chaussées, ballasts qui nécessitent des granulats plus durs).

Cette résistance est mesurée par l'essai Los-Angeles (action de chocs dans un broyeur à boulets) et par l'essai Micro-Deval (usure par frottements en présence d'eau).

La propreté des sables est aussi un paramètre fondamental.

Les argiles représentent la pollution la plus fréquente, leur présence entraîne toujours une diminution de résistance (figure 3.7) et il est prudent de ne pas dépasser les seuils limites spécifiés pour chaque technique.

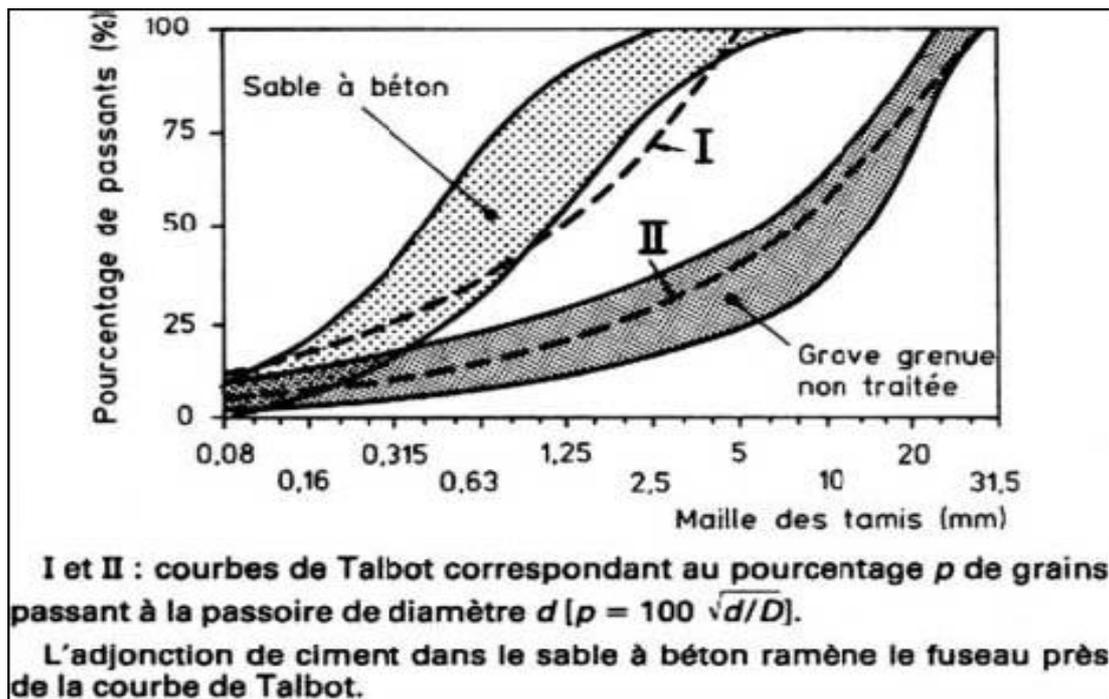


Figure 3.7 – Fuseaux et courbes de Talbot

La propreté des sables est évaluée par deux essais complémentaires.

L'équivalent de sable où le sable est agité dans une éprouvette en présence d'eau et d'un flocculant, puis sédimenté avec un contre-courant ascendant qui rassemble les argiles, mais aussi une bonne partie des fines, au-dessus des plus gros éléments. Le rapport hauteur du sable sur hauteur totale donne, en pour-cent, l'équivalent de sable (ES). Tant que cet essai donne de bons résultats ($ES > 60$) c'est que le sable est propre. Si le résultat est mauvais, cela peut être dû au piégeage accidentel de fines inertes (calcite, quartz) dans le flocculant ou à la présence d'un excès d'argiles. Pour le savoir on effectue alors, et seulement si le résultat de l'ES est mauvais, un essai dit au bleu basé sur l'adsorption de bleu de méthylène qui ne se fixe que sur les argiles.

Il existe d'autres caractéristiques des granulats qui n'ont d'importance que pour des usages particuliers qui sont précisés dans le tableau 3.4.

3.4.2 Utilisations particulières

Les granulats lourds sont en général des minerais ou des métaux. Certains minerais sont utilisés pour la fabrication de bétons lourds ou destinés à assurer une protection contre les rayonnements. La barytine (SO_4Ba) et la magnétite (Fe_3O_4), avec des masses volumiques comprises entre 4 et 5 g/cm^3 , sont le plus couramment utilisées. On trouvera une liste non limitative de ces granulats dans l'article Structure des réacteurs nucléaires.

Les granulats légers proviennent de l'expansion d'argiles, de schistes, de verres et de laitiers, de pouzzolanes et plus rarement des laves poreuses que sont les ponces.

Les granulats utilisés pour les drains ont des granularités très serrées comme les gravillons pour enduits ou les ballasts.

Le choix de la granularité dépend de la charge des eaux à drainer, d est supérieur à 10 mm pour une eau chargée en sable et en argiles, d est indifférent pour des eaux non chargées. La résistance mécanique n'intervient que si le drain est sollicité ; c'est le cas des ballasts, par exemple, ou un coefficient Los-Angeles inférieur à 15 (résistance aux chocs) est exigé.

Les granulats réfractaires sont représentés par les roches silicatées qui résistent en général jusqu'à 1 000 °C ; les basaltes ont le meilleur comportement dans ce domaine . Au - delà de 1 000 °C il faut faire appel à des granulats particuliers : corindon (Al_2O_3) naturel ou artificiel ou bauxite calcinée à 1 600 °C.

Les granulats anti-usure et en général anti-dérapants sont les plus riches en quartz : quartzites, certains microgranites et les granulats artificiels comme le corindon et la bauxite calcinée.

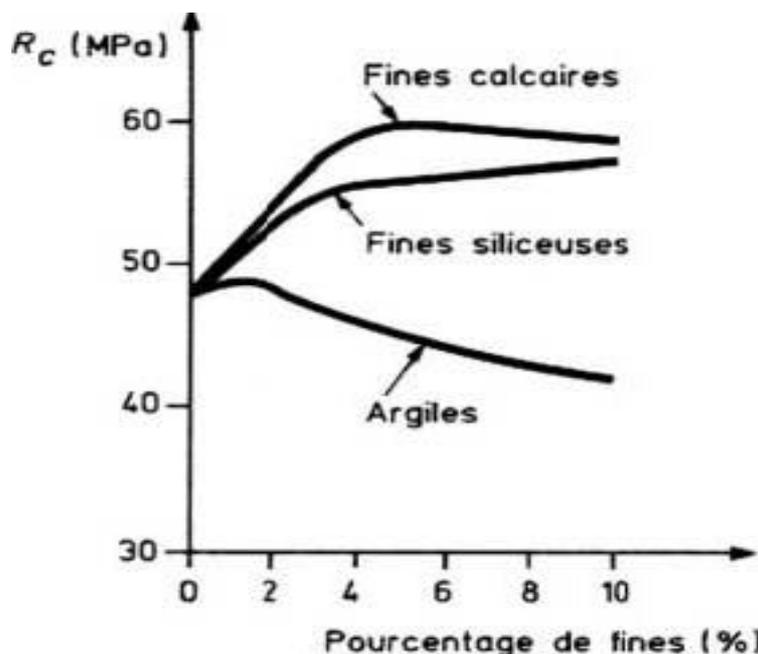


Figure 3.8 – Variation de la résistance en compression R_c d'un mortier en fonction de la nature des fines

Tableau 3.4 Importance des propriétés des granulats en fonction des techniques et limites des valeurs spécifiées et couleurs des roches

Tableau 4 – Importance des propriétés des granulats en fonction des techniques et limites des valeurs spécifiées									
Propriétés (1)	Bétons hydrauliques		Graves			Bétons bitumineux		Enduits superficiels Clous	Ballasts
	bâtiments	chaussées	non traitées	hydrauliques	bitume	liaison support	roulement		
Granularité	F	F	F	F	F	F	F	F	F
Forme (%)	m ≤ 30	m ≤ 30	*	*	*	m ≤ 20	F ≤ 15 ≤ 20	F ≤ 10 ≤ 20	m ≤ 14
Angularité (2)	*	*	F 0 à 60 % D	F 0 à 100 % D	F 0 à 100 % D	F 30 % D à 4 D	F 60 % D à 4 D	F 100 % D à 6 D	F pas d'alluvions
Propreté des sables (%)	F ≥ 80 ≥ 85	F ≥ 75 ≥ 85	F ≥ 50	F ≥ 50	F ≥ 60	F ≥ 60	F ≥ 60	*	*
Propreté des gravillons (%)	m ≤ 2	m ≤ 2	f ≤ 2	f ≤ 2	m ≤ 2	F ≤ 2	F ≤ 1	F ≤ 0,5 ≤ 2	F 0,8
Matières organiques	F	F	*	F	*	*	*	*	*
Réaction alcalis-granulats	F	f	*	*	*	*	*	*	*
Résistance aux chocs (%)	m ≤ 25 ≤ 40	f ≤ 25 ≤ 40	m ≤ 25 ≤ 40	m ≤ 30 ≤ 40	m ≤ 25 ≤ 40	F ≤ 20 ≤ 30	F ≤ 20 ≤ 25	F ≤ 15 ≤ 25	F ≤ 15
Résistance à l'usure (%)	f ≤ 20 ≤ 35	F ≤ 20 ≤ 35	m ≤ 20 ≤ 35	m ≤ 25 ≤ 35	m ≤ 20 ≤ 35	F ≤ 15 ≤ 25	F ≤ 15 ≤ 20	F ≤ 10 ≤ 20	F ≤ 10
Résistance au polissage	*	m ≥ 0,50 ≥ 0,45	*	*	*	*	F ≥ 0,55 ≥ 0,50	F ≥ 0,55 ≥ 0,50	*
Friabilité des sables (%)	*	F ≤ 20 ≤ 40	*	*	*	*	*	*	*
Porosité Absorption d'eau (%)	m ≤ 2 ≤ 5	m ≤ 2	*	*	m	F	F	*	*
Gel (%)	f ≤ 50	f ≤ 50	m	m	f	f	*	*	*
Homogénéité (%)	F ≥ 97	F ≥ 97	*	*	*	*	m	F	F ≥ 94

(1) Importance forte : F, moyenne : m, faible : f et sans objet : *
Dans certains cas, on a deux limites spécifiées.

(2) 0 à x % D : proportion de matériaux supérieurs à D qui ont été concassés.

Tableau 5 – Couleurs approximatives des principales roches						
Couleurs	blanc	crème, beige, ocre	rose, rouge	verdâtre	gris	noir
Roches	Silex chauffés Calcaires	Alluvions Silex chauffés Calcaires	Granites Microgranites Rhyolites Pouzzolanes Grès	Microdiorites Diorites Dolérites Amphibolites	Granites Microgranites Ponces Quartzites Calcaires	Calcaires Basaltes Gabbros

Les granulats anti-corrosion doivent résister aux produits chimiques : c'est le cas de tous les silicates.

Des granulats abrasifs sont fabriqués à partir de sables de dunes qui contiennent plus de 80 % de quartz, de corindon ou de divers carbures métalliques.

L'utilisation des parties les plus fines (80 μm) sous forme de charge couvre un très large domaine : papeterie, alimentation pour bétail, colles, caoutchoucs, cosmétiques, etc.

Les architectes recherchent souvent des granulats dits architectoniques, intéressants par leur forme (alluvionnaires roulés) ou par leur couleur. Il n'existe pas, à l'heure actuelle, de répertoire des couleurs des granulats, les tendances les plus connues sont données dans le tableau 3.4.

3.5. Propriétés des roches exploitées

Les granulats empruntent aux roches dont ils sont issus une grande partie de leurs propriétés et en particulier toutes leurs caractéristiques intrinsèques, c'est-à-dire celles qui dépendent de la composition minéralogique et de la texture pétrographique.

3.5.1 Minéraux de base

Les roches sont constituées par des assemblages de minéraux.

Les minéraux les plus répandus dans l'écorce terrestre sont des silicates (environ 90 %). Le reste comprend des carbonates, des oxydes métalliques, des sulfates, des sulfures, etc.

Silicates

Les silicates sont essentiellement des arrangements géométriques d'ions oxygène, groupés par quatre autour d'ions silicium (tétraèdres).

Des ions silicium sont parfois remplacés par des ions aluminium, l'équilibre des charges électriques étant alors assuré par des ions potassium, sodium, calcium, etc. Le type d'arrangement caractérise la famille à laquelle appartient le silicate. Les proportions d'ions silicium et aluminium, l'existence d'ions fer, magnésium, etc., introduisent des variétés plus ou moins différenciées au sein de chaque famille.

Le quartz est le représentant le plus commun de la silice. Il appartient à la famille des tectosilicates, à tétraèdres disposés en charpente. C'est un minéral inaltérable, très dur (dureté Vickers de 1 280 kg/mm²), incolore et à éclat gras. Il se trouve dans certaines roches magmatiques, dans des roches sédimentaires, où il est parfois le seul constituant, et dans des roches métamorphiques.

Il convient de préciser que l'essai Vickers consiste à faire pénétrer une pointe diamantée en forme de pyramide à base carrée dans une face du minéral étudié, et que la dureté Vickers est définie par le rapport de la charge appliquée à la surface de l'empreinte produite.

Les feldspaths sont aussi des tectosilicates. Ils sont potassiques (orthose, microcline, etc.), sodi-potassiques (anorthose), sodi-calciques (série isomorphe continue des plagioclases allant de l'albite à l'anorthite), ou moins riches en silice (feldspathoïdes). Ce sont des minéraux

Granulats, origines et caractéristiques

altérables, moyennement durs (750 kg/mm²), incolores, roses ou blancs, et brillants suivant des plans de clivage bien développés. Ils se rencontrent dans la plupart des roches magmatiques et dans beaucoup de roches métamorphiques.

Les micas appartiennent à la famille des phyllosilicates, à tétraèdres disposés en feuillets.

Ce sont des minéraux altérables, très tendres (85 kg/mm²), apparaissant en prismes aplatis à clivages parfaits et à débit en minces lamelles flexibles et élastiques. Ils sont alumineux blancs et nacrés (muscovite) ou ferro-magnésiens noirs et brillants (biotite). Ils existent dans les roches magmatiques et métamorphiques en proportions très variables.

Les pyroxènes appartiennent à la famille des inosilicates, à tétraèdres disposés en chaîne droite simple. Ce sont des minéraux ferro-magnésiens (augite, diopside, etc.), altérables, moyennement durs (710 kg/mm²), de couleur sombre et à éclat métallique, se présentant en prismes allongés. Ils se trouvent dans les roches magmatiques sans quartz.

Les amphiboles sont aussi des inosilicates, mais à tétraèdres disposés en deux chaînes droites. Ce sont des minéraux ferro-magnésiens (hornblende, actinote, etc.), altérables, moyennement durs (730 kg/mm²), de couleur sombre sans éclat particulier, se présentant en aiguilles ou en fibres. Elles se rencontrent dans les roches magmatiques pauvres en quartz et dans les roches métamorphiques.

Les péridots appartiennent à la famille des nésosilicates, à tétraèdres isolés. Ce sont des minéraux ferro-magnésiens (olivine), altérables, moyennement durs (800 kg/mm²), de couleur verdâtre et à éclat vitreux, apparaissant en prismes trapus. Ils existent dans les roches magmatiques sans quartz.

Les argiles sont des phyllosilicates hydratés (kaolinite, illite, montmorillonite, chlorite, etc.). Elles résultent de l'altération par hydrolyse des silicates altérables.

Par ailleurs, les silicates de métamorphisme, tels les silicates d'alumine anhydres (andalousite, disthène, sillimanite) et les silicates alumineux ferro-magnésiens (cordiérite, staurotide), ont leurs tétraèdres unis entre eux par des ions aluminium. Ce sont des minéraux stables, très caractéristiques des roches métamorphiques.

Minéraux non silicatés

Les carbonates sont nombreux mais seuls deux d'entre eux sont importants. La calcite est un carbonate de calcium, très tendre (110 kg/mm²), de couleur blanchâtre et à éclat vitreux, se présentant en cristaux xénomorphes ou automorphes à clivages parfaits et à macles simples fréquentes. Elle fait effervescence avec un acide dilué à froid. Elle se trouve essentiellement dans des roches sédimentaires, comme minéral constitutif des calcaires par exemple, et dans

Granulats, origines et caractéristiques

certaines roches métamorphiques. Son polymorphe l'aragonite, métastable à température ordinaire, se transforme généralement en calcite.

La dolomite est un carbonate double de calcium et de magnésium, moyennement tendre (350 kg/mm²), de couleur blanchâtre à jaunâtre et à éclat vitreux, apparaissant en prismes nets à clivages parfaits et à macles simples rares. Elle ne fait pas effervescence avec un acide dilué à froid. Elle se rencontre dans des roches sédimentaires.

Les oxydes d'aluminium (corindon) et de titane (ilménite, rutile) sont accessoires dans les roches magmatiques et métamorphiques.

Les oxydes de fer (hématite, magnétite) sont plus répandus mais toujours accessoires dans ces roches.

Le gypse, et l'anhydrite son équivalent non hydraté, sont des sulfates de calcium très tendres (75 kg/mm²), blanchâtres en masse mais translucides lorsqu'ils sont bien cristallisés. Ils sont accessoires dans les roches sédimentaires.

La pyrite est un sulfure de fer, relativement dur (1 050 kg/mm²), de couleur jaune d'or et à éclat métallique. Elle est accessoire dans toutes les roches.

3.5.2 Roches magmatiques

■ Les roches de la famille des granites sont de teinte claire. Elles renferment obligatoirement du quartz et un feldspath potassique ; elles contiennent également des micas et des feldspaths sodiques, et accessoirement des amphiboles.

Les granites sont des roches plutoniques grenues très communes (figure 3.9 voir annexe C, au microscope optique polarisant). Leur résistance est conditionnée en grande partie par la dimension de leur grain ; de façon générale, plus le grain est fin, meilleure est la résistance.

Les microgranites ont une structure microgrenue, le plus souvent porphyrique avec de grands cristaux de feldspath ou de quartz. La plupart possèdent une bonne résistance.

Les rhyolites sont des roches volcaniques, à structure fluidale plus ou moins sphérolitique par dévitrification. Leur texture extrêmement fine les rend peu perméables donc peu sensibles aux altérations et de ce fait très résistantes.

Les tufs rhyolitiques sont des produits de projections volcaniques d'excellente résistance lorsque le ciment qui les lie est bien développé.

■ Les roches de la famille des diorites sont de teinte blanchâtre à noirâtre. Elles sont composées essentiellement de feldspaths à dominante sodique et d'amphiboles, avec un peu de micas, les pyroxènes étant accessoires et le quartz rare voire absent.

Les diorites sont des roches plutoniques grenues, dont la résistance dépend principalement de la dimension de leur grain.

Granulats, origines et caractéristiques

Les microdiorites ont une structure microgrenue avec des minéraux finement enchevêtrés, ce qui leur confère généralement une bonne résistance.

Les andésites sont des roches volcaniques, à structure microlitique fluidale, à aspect scoriacé et vacuolaire. Leur résistance est fonction de leur porosité.

■ Les roches de la famille des gabbros sont de teinte sombre. Elles sont constituées essentiellement de feldspaths à dominante calcique et de pyroxènes, avec souvent des amphiboles et parfois des péridots, les micas étant rares et le quartz totalement absent.

Les gabbros sont des roches plutoniques grenues facilement altérables, ce qui détériore grandement leur résistance. Les faciès sains s'avèrent néanmoins de bonne qualité.

Les microgabbros ont une structure microgrenue, mais sont fréquemment altérés. Leur résistance varie selon leur degré d'altération.

Les ophites, quant à elles, se distinguent par leur structure particulière à grands cristaux enchevêtrés de pyroxènes englobant des petites lattes de plagioclases calciques, ce qui leur donne une excellente qualité ; cependant, elles sont très souvent altérées et prennent alors une couleur verte (serpentine).

Les basaltes sont des roches volcaniques très communes (figure 3.10 voir annexe C), à structure microlitique voire vitreuse dans certains cas, à aspect compact mais quelquefois vacuolaire. La plupart sont très résistants mais sensibles au polissage.

3.5.3 Roches sédimentaires

Les grès sont des roches détritiques terrigènes, cohérentes, communes, de teinte claire, composées essentiellement de grains de quartz plus ou moins arrondis liés par un ciment siliceux (figure 3.11 voir annexe C). Leur résistance est conditionnée en grande partie par la dimension des grains de quartz et l'abondance du ciment siliceux.

Les calcaires sont des roches carbonatées très communes, constituées essentiellement de calcite et de dolomite en proportions variables : calcaires purs (95 à 100 % de calcite), calcaires magnésiens (5 à 10 % de dolomite), calcaires dolomitiques (10 à 50 % de dolomite).

Outre la composition minéralogique, le milieu et les conditions de sédimentation, la structure et la texture, l'importance des fossiles, sont aussi à l'origine d'une grande diversité de calcaires et en conséquence d'une large gamme de résistances (figure 3.11 voir annexe C). En revanche, les calcaires ont généralement tendance à se polir et ce d'autant plus rapidement que leur pâte est plus riche en calcite et que leur grain est plus fin (la présence de quartz peut certes ralentir ce processus de polissage, mais elle accroît alors l'abrasivité).

Les matériaux alluvionnaires sont des roches détritiques terrigènes, non consolidées, très communes, de composition minéralogique extrêmement variée en raison de la diversité

géologique des bassins versants des cours d'eau qui les ont déposées. Ce sont des mélanges de fragments et de débris, qui proviennent de l'érosion des roches magmatiques et métamorphiques et/ou des roches sédimentaires existantes. Ils se caractérisent de ce fait par une grande hétérogénéité tant pétrographique que granulométrique, laquelle se traduit par un large éventail de résistances.

3.5.4 Roches métamorphiques

Les gneiss résultent de la transformation des granites (figure 3.12 voir annexe C). Ce sont des roches à grain moyen ou grossier et à foliation nette caractérisée par une alternance de lits clairs (quartz, feldspaths) et de lits sombres (micas principalement). Leur résistance dépend de la dimension du grain ainsi que de la proportion et de la continuité des lits de micas.

Les leptynites dérivent du métamorphisme de certains granites. Ce sont des roches homogènes à grain fin, compactes, de teinte claire, à foliation peu marquée, riches en quartz et feldspaths mais pauvres en micas. Leur résistance est de ce fait meilleure que celle des gneiss.

Les amphibolites résultent de la transformation des basaltes (figure 3.13 voir annexe C). Ce sont des roches très dures à texture massive et de teinte sombre. Elles sont constituées essentiellement de cristaux d'amphiboles visibles à l'oeil nu et plus ou moins ordonnés dans les plans de schistosité ; des feldspaths calciques sont toujours présents, mais peu abondants et parfois groupés en lits.

Les quartzites proviennent de la métamorphisation des grès. Ce sont des roches siliceuses compactes, à cassure conchoïdale lisse ou esquilleuse, de couleur claire et d'aspect gras, où les anciens grains détritiques de quartz sont englobés dans des plages de quartz néoformé. Les quartzites sont généralement résistants mais très abrasifs.

Les cornéennes témoignent d'un métamorphisme de contact.

Elles correspondent à des faciès haute température, générés par l'intrusion d'un pluton. Ce sont des roches très dures à texture massive, non fissiles, à patine et à cassure d'aspect corné. Elles sont composées de fins cristaux fortement engrenés et enchevêtrés de quartz, de feldspaths et, en proportions variables, de micas, d'amphiboles et de pyroxènes.

3.6-Granulats. Production et utilisations : [48]

3.6.1 Production des granulats

Les granulats naturels sont produits dans des carrières (figures 3.14 et 3.15 voir annexe C), et chacune d'elles occasionne une occupation temporaire du sol, c'est-à-dire une parenthèse dans l'histoire du site.

Rappel de définitions

Les granulats sont des matériaux granulaires de dimensions n'excédant pas 125 mm, auxquels s'ajoutent les enrochements de dimensions supérieures à 125 mm mais de masses inférieures ou égales à 15 tonnes. Ils sont désignés par leurs plus petites et plus grandes dimensions d et D , l'intervalle d/D étant appelé classe granulaire. Cette désignation admet que des éléments puissent être retenus sur un tamis à mailles carrées d'ouverture D (tamis D) et que d'autres puissent passer au travers du tamis d , dans les limites normalisées permises.

Trois grandes familles de granulats sont ainsi définies :

- les sables, où $d = 0$ et ; $2 < D < 6,3$ m m
- les gravillons, où et ; $d > 1$ m m et . $2 < D < 90$ m m
- les graves, où $d = 0$ $2 < D < 90$ m m

Les fines constituent leur fraction granulaire au travers du tamis de 0,063 mm.

Les granulats les plus couramment utilisés dans le bâtiment et le génie civil ont une masse volumique réelle comprise entre 2 et 3 Mg/m³.

Avant toute ouverture de carrière, l'accès au gisement représente une tâche administrative et environnementale de grande ampleur qui peut facilement durer 5 à 10 ans.

La période de production proprement dite est généralement plus longue dans les roches massives que dans les roches meubles .

Enfin, lorsque le gisement est épuisé, ou au fur et à mesure de son exploitation, le site fait l'objet d'une remise en état conforme au projet et au plan de financement établis selon la législation en vigueur, laquelle est extrêmement contraignante en matière de protection de l'environnement.

L'implantation d'une unité nouvelle, ou la transformation d'une unité existante, nécessite la réalisation d'études préalables visant notamment à :

- caractériser le gisement sur les plans géologique et géotechnique ;
- estimer le marché potentiel en termes quantitatif et qualitatif ;
- définir les moyens techniques qu'il convient de mettre en œuvre dans le cadre d'une démarche industrielle ;
- rechercher la rentabilité financière du projet.

La connaissance des conditions de gisement et la maîtrise des outils de production, optimisée grâce au développement de la mécanisation et à l'avènement de l'automatisation, concourent à accroître la productivité des exploitations et à obtenir la régularité recherchée des granulats.

La production de granulats artificiels ou recyclés, quant à elle, a le mérite de ne pas consommer de ressources naturelles et de ne pas modifier la topographie des terrains d'accueil des installations.

De manière générale, l'élaboration des granulats comprend deux opérations principales distinctes : l'extraction et le transport vers les unités de traitement d'une part, le traitement proprement dit d'autre part.

- Extraction et transport vers les unités de traitement

- Gisements de roches massives

L'extraction peut être exécutée soit sur un seul front par tranches horizontales successives (figure 3.16 voir annexe C), soit sur plusieurs fronts par tranches horizontales simultanées. La première méthode est la plus fréquemment appliquée, la seconde étant plus particulièrement réservée aux gisements de moyenne puissance mais de faible épaisseur en regard de leur superficie. Selon la topographie du site, l'extraction progresse à flanc de coteau ou en fosses emboîtées.

■ La découverte consiste à mettre à nu la partie saine de la roche à exploiter. La terre végétale est d'abord décapée au boteur ou au scrapeur puis disposée en cordons à la périphérie du gisement ou transportée sur une aire de dépôt, pour être éventuellement réutilisée plus tard au moment du réaménagement du site.

Les matériaux stériles et les parties altérées du gisement sont également mis en dépôt (ou éventuellement réutilisés comme matériaux de remblai). Cette opération, parfois précédée d'un pré-minage, est réalisée au boteur voire à la pelle hydraulique avec chargement sur tombereau rigide lorsque le dépôt est éloigné.

La partie saine du gisement étant naturellement fracturée, le géologue peut en dresser une carte à deux dimensions en observant le front de taille, et, à l'aide de logiciels disponibles sur le marché, en avoir une idée à trois dimensions.

■ L'abattage a pour but de réduire la roche saine en place en blocs de tailles compatibles avec les possibilités des engins de chargement et de transport d'une part, et avec le gabarit du concasseur primaire d'autre part.

L'abattage est réalisé par un tir à l'explosif disposé dans des trous forés, alignés sur plusieurs plans parallèles au front de taille, qui peut être incliné jusqu'à 20 ° par rapport à la verticale. La détonation de l'explosif transmet au massif rocheux une puissante onde de choc, qui broie la roche dans son voisinage immédiat, initie une fracturation radiale au-delà et engendre une fracturation parallèle à toute surface libre sur laquelle elle se réfléchit. Elle produit également

Granulats, origines et caractéristiques

un gaz à haute température et haute pression, qui prolonge les fractures radiales et éjecte les blocs fracturés.

La hauteur du front de taille est limitée par la réglementation française à 15 m, pour prévenir les risques de déviation de forage.

La largeur de la tranche à abattre, appelée banquette, est en général de 3 à 6 m. La maille de foration est la surface comprise entre 4 trous d'abattage. Elle est généralement comprise entre 10 et 20 m² (la maille courante étant de 3 m × 4 m), suivant la blocométrie désirée.

La foration des trous associe un mouvement de descente, par percussion d'un marteau muni d'un outil taillant, à un mouvement de rotation. Les outils taillants peuvent forer entre quelques dizaines et plusieurs centaines de mètres, suivant la dureté et l'abrasivité de la roche : un quartzite est très abrasif, un calcaire l'est peu.

Les explosifs utilisés pour les tirs peuvent être soit en cartouche (dynamites ou émulsions), soit en vrac (pulvérulents, ou éventuellement fabriqués sur place dans des unités mobiles à partir de nitrate et de fuel, et plus ou moins chargés de poudre d'aluminium lorsque les trous sont remplis d'eau). Cette seconde solution a l'avantage d'éviter au carrier les contraintes liées à la sécurité et à la sûreté (prévention du vol) du transport et du stockage des explosifs.

Les quantités utilisées (50 à 150 g/t de matériau abattu) dépendent des caractéristiques du gisement et sont déterminées par la maille de foration et le diamètre des trous.

Des microretards à l'amorçage, entre les plans de forage, permettent d'optimiser la répartition de la taille des blocs abattus et surtout de diminuer fortement l'amplitude des vibrations du sol qui se propagent vers l'intérieur comme vers l'extérieur de la carrière, en étalant les détonations dans le temps.

Une fragmentation secondaire est quelquefois nécessaire sur les blocs trop gros pour la suite des opérations. Elle est réalisée le plus souvent à l'aide d'un marteau brise roche hydraulique (BRH), ou, lorsque cela est permis, par pétardage en introduisant des cartouches d'explosif dans des trous préalablement forés.

■ Après chaque tir, les matériaux abattus sont exploités en butte par un engin de chargement évoluant à leur pied. Lorsque les distances de transport sont inférieures à 150 m, il est possible d'utiliser une chargeuse sur pneumatiques assurant les fonctions chargement et transport vers le concasseur primaire. Pour des distances plus grandes, le transport est effectué par des tombereaux rigides ou dumpers de 35 à 50 t de charge utile ou par des tombereaux articulés lorsque les conditions de roulage sont difficiles.

-Gisements de roches meubles

Les gisements de roches meubles reposent sur un mur de substratum non exploitable et sont limités par un toit surmonté d'une découverte. Entre le mur et le toit, se situe le gisement proprement dit, dont l'épaisseur est appelée puissance.

Trois cas peuvent se présenter suivant les niveaux respectifs du mur, du toit et de la nappe d'eau qui baigne fréquemment une partie des gisements :

— si le niveau de la nappe est inférieur à celui du mur, le site est hors d'eau et le gisement est exploité à sec ;

— si le niveau de la nappe est supérieur à celui du toit, le site est immergé et le gisement est exploité sous eau ;

— si le niveau de la nappe est compris entre ceux du mur et du toit, le site est semi-immersé et le gisement est généralement exploité en deux phases distinctes.

■ La découverte est gérée comme pour les roches massives quand le site est hors d'eau. Lorsqu'il est immergé, on peut procéder à un rabattement de la nappe par pompage, si la perméabilité du terrain le permet ; sinon, le décapage de la découverte est généralement effectué, depuis le haut, à la pelle hydraulique équipée en rétro. La nature de la découverte peut être très différente de celle des matériaux exploitables (présence notamment de matière organique, de tourbe, de pyrite, très nocives surtout dans les bétons). Il est donc indispensable, là aussi, d'inclure la découverte dans le système qualité de la carrière.

■ En site hors d'eau, deux modes d'extraction sont possibles :

— en fouille, par pelle hydraulique équipée en rétro, pour des puissances de gisement n'excédant pas 4 m et lorsqu'il existe des zones indurées ;

— en butte, par chargeuse sur pneumatiques, pour la plupart des autres cas. Si la puissance du gisement dépasse toutefois 12 m, l'exploitation est conduite par paliers.

En site immergé, si le rabattement de la nappe est possible, on est ramené au problème précédent. Sinon, on utilise des dragues généralement à godets. Les matériaux sont traités sur la drague par criblage et lavage, ou évacués par bandes transporteuses flottantes. Lorsque la puissance du gisement est importante, on a recours à des dragues à grappin ou à des dragues suceuses.

En site semi-immersé, si le rabattement de la nappe est possible, on est ramené au cas du site hors d'eau. Si la puissance du gisement est supérieure à 10 m, on emploie des dragues.

Pour les autres cas, on utilise des engins à terre en bord de fouille :

— Pelle hydraulique équipée en rétro, pour les gisements pauvres en sables et à faible hauteur immergée (moins de 4 m) ;

— Dragueline disposant les matériaux en cordon en bord de fouille, pour qu'ils soient repris à la chargeuse après essorage ;

— excavateur à godets monté sur chenilles parallèles au front d'extraction, et évacuant les matériaux par transporteur orientable lorsque le gisement est homogène.

■ Outre les tombereaux rigides ou articulés, comme pour les roches massives, sont utilisés plus spécifiquement :

— le transport par convoyeurs (bandes transporteuses), de loin le plus fréquent ;

— le transport hydraulique sous forme de pulpe dans des tuyauteries flottantes ;

— le transport par eau à l'aide de barges, ou de bateaux trémies auto-déchargeants pour les granulats marins en particulier.

3.6.2 Traitement proprement dit

Une installation de carrière comprend plusieurs postes de fabrication, constitués par une succession d'opérations de fragmentation (concassage) et de classement (criblage) des matériaux, ainsi que des dispositifs de manutention (engins sur pneus et bandes transporteuses). Des stockages intermédiaires soit en trémies, soit en tas au sol avec reprise par extracteurs en souterrain ou par engins mobiles, assurent l'indépendance fonctionnelle des postes de fabrication.

Les opérations de réduction volumétrique peuvent éventuellement être complétées par un tripréalable, éliminant les éléments stériles, terreux et friables, et par des actions de lavage voire de débouillage, éliminant les éléments polluants argileux agglomérés entre eux ou collés à la surface des matériaux.

L'installation se compose généralement de deux ensembles distincts, l'étage primaire qui réduit les blocs d'abattage (roches massives) ou le tout-venant d'extraction (roches meubles), et l'usine d'élaboration, qui fabrique les produits finis. Les produits marchands sont ensuite stockés en trémies ou en tas dans l'attente d'être expédiés et commercialisés.

La conception d'une chaîne de concassage-criblage est conditionnée par les objectifs que l'on veut atteindre (quantités à produire, classes granulaires à obtenir) et les propriétés de la roche que l'on doit traiter (nature pétrographique et composition minéralogique, abrasivité et proportion d'éléments durs, résistance mécanique et fragilité). En outre, lorsque l'argilosité de la roche le nécessite, une unité de lavage est ajoutée à la chaîne de traitement.

-Concassage

Le concassage consiste à réduire la taille des morceaux de roches. Le choix du type et de la taille d'un appareil de concassage est fonction de la granularité d'entrée, de la charge circulante, et du débit de sortie.

Deux types d'appareils de concassage peuvent actuellement être mis en place :

- les appareils travaillant par compression, où les matériaux subissent une action répétée d'écrasement entre deux pièces (concasseurs à mâchoires, concasseurs giratoires) ;
- les appareils opérant par chocs, où les matériaux sont soit frappés violemment par un organe tournant à grande vitesse (concasseurs à percussion et axe horizontal), soit projetés sur un écran de fragmentation sous l'effet de la force centrifuge (concasseurs à projection et axe vertical).

Le concasseur à mâchoires (figures 3.17 et 3.18 voir annexe C) comprend une mâchoire fixe et une mâchoire mobile suspendue à un arbre excentrique muni d'un lourd volant d'inertie. La mâchoire mobile se rapproche de la mâchoire fixe lorsqu'elle descend ; elle s'en écarte lorsqu'elle monte, entraînant ainsi la chute des matériaux entrants. Dans les concasseurs à mâchoires dits à double effet, la partie inférieure de la mâchoire mobile décrit un mouvement horizontal.

Le réglage de la largeur minimale entre les deux mâchoires permet de maîtriser la granularité des produits sortants.

Le concasseur giratoire (figure 3.19 voir annexe C) réduit les matériaux entre un cône fixe extérieur et un cône mobile intérieur animé par un excentrique.

Les phases de compression-décompression que subissent les matériaux sont beaucoup plus nombreuses que celles générées par le concasseur à mâchoires et s'accompagnent d'attrition, ce qui tend à produire des formes plus isotropes.

Le concasseur à percussion et axe horizontal est constitué d'un rotor muni de pièces de chocs ou percuteurs, qui tourne à grande vitesse à l'intérieur d'une enceinte fermée équipée de plaques de chocs ou enclumes. Les percuteurs du rotor frappent les matériaux entrants et les projettent sur les enclumes de l'enceinte. Le réglage de la granularité des produits sortants est effectué en agissant sur la vitesse du rotor et l'espacement entre les percuteurs et les enclumes.

Le concasseur à projection et axe vertical (figure 3.20 voir annexe C) travaille principalement par chocs des matériaux entre eux. Le rotor tourne à grande vitesse et projette les matériaux entrants à la périphérie de l'appareil sur un talus de morceaux de matériaux. Il existe cependant d'autres machines, où les matériaux entrants viennent heurter des enclumes fixées

sur le stator. La granularité des produits sortants est essentiellement conditionnée par la vitesse du rotor.

- Criblage

Le criblage est l'opération qui permet de séparer un ensemble de grains d/D en au moins deux sous-ensembles d/m et m/D , d/m étant le passant au travers de la maille de criblage m et m/D le refus sur cette même maille de criblage m .

Deux fonctions principales peuvent être distinguées :

- le criblage technique, affecté à l'orientation de la charge circulante vers une unité de concassage et/ou de stockage ;
- le criblage classificateur, destiné au tri des produits finis suivant des caractéristiques dimensionnelles spécifiées.

Le criblage est le plus souvent effectué à l'aide d'un crible vibrant (figure 3.21 voir annexe C), constitué d'un arbre à balourd sur lequel sont fixées des toiles de criblage.

La toile de criblage est généralement faite de fils d'acier entrecroisés.

Toutefois, lorsque les matériaux sont très abrasifs, on utilise de préférence des panneaux de polyuréthane perforés plus résistants.

La surface de criblage est calculée à partir de certaines lois qui prennent en compte la maille de criblage, le débit recherché, la granularité du matériau à cribler, sa nature et son angularité ; plus la maille de criblage est petite, plus le débit est faible.

Des grilles fixes de scalpage, à barreaux longitudinaux, peuvent en outre être placées en amont du concasseur primaire, pour éliminer les matériaux indésirables (éléments fins contenant par exemple des argiles, etc.).

- Lavage

Le lavage a pour but d'éliminer les fines polluantes (argiles essentiellement), agglomérées entre elles ou collées à la surface des produits finis.

Les gravillons sont lavés sur crible par arrosage abondant (figure 3.22 voir annexe C).

Les sables peuvent l'être au moyen de l'un des quatre procédés ci-après :

- le séparateur à cône ; le sable est introduit par le centre du cône, l'eau et les fines argileuses sont évacuées par débordement et le sable est récupéré en bas du cône ;
- le classificateur à spirale (ou décanteur à vis) ; le sable est introduit au pied d'une vis sans fin inclinée, l'eau et les fines argileuses sont évacuées par débordement au pied de la vis et le sable est entraîné vers le haut par la vis ;

Granulats, origines et caractéristiques

— la roueessoreuse ; le sable est déversé dans une auge où il décante ; des godets perforés fixés sur une roue remontent ensuite le sable qui est récupéré dans une goulotte après renversement des godets, l'eau et les fines argileuses étant évacuées par débordement ;

— l'hydrocyclone ; le sable est introduit sous pression dans un cyclone tronconique ; une fois lavé, il est récupéré par le bas de l'appareil (sous-verse), l'eau et les fines argileuses étant évacuées vers le haut (sur-verse) par un orifice axial.

Les tout-venants sont lavés à l'aide d'un laveur débourbeur, cylindre métallique rotatif muni à l'intérieur de pales assurant le brassage des matériaux dans un courant d'eau. Le mouvement de rotation du cylindre est transmis par un train de pneumatiques sur lequel il repose.

Les gravillons lavés sortent d'un côté, et les boues sableuses sortent de l'autre pour être dirigées vers une installation de lavage des sables.

3.7. Protection de l'environnement

Les carrières sont souvent ressenties par le grand public au travers des atteintes qu'elles portent à l'environnement, par suite des nuisances qu'elles occasionnent et des bouleversements des sols et des paysages, qu'elles engendrent. Sous la pression des écologistes, les producteurs de granulats se sont mobilisés ; des progrès importants ont été accomplis en matière de réduction des bruits, des vibrations et des poussières, de traitement des eaux et des boues, de réhabilitation des sites de production, etc.

Parallèlement, la législation sur les carrières a été modifiée et renforcée dans le but de protéger efficacement le cadre de vie.

Désormais, toutes les exploitations, quels que soient les seuils de superficie et de production, sont soumises à autorisation, avec production d'une étude d'impact analysant les effets du projet sur l'environnement. Le dossier fait l'objet d'une enquête publique d'une durée d'un mois dans chacune des communes intéressées, puis est soumis pour avis à la commission départementale des carrières.

L'autorisation d'ouverture et d'exploitation est délivrée par arrêté préfectoral pour une durée maximale de trente ans renouvelable. Il y a en outre maintenant obligation, pour tout producteur de granulats, d'apporter des garanties financières destinées à la remise en état de son site, après exploitation, ou pendant celle-ci en cas de défaillance.

De plus, un schéma définissant les conditions générales d'implantation des carrières doit désormais être institué dans chaque département.

Ce schéma est élaboré par la commission départementale des carrières et approuvé par le préfet après avis du conseil général. Il doit prendre en compte les ressources et les besoins en matériaux du département et des départements voisins, la protection des sites et des milieux

naturels sensibles, la nécessité d'une gestion équilibrée de l'espace, tout en favorisant une utilisation économe des matières premières. Il fixe en outre les objectifs à atteindre en termes de remise en état et de réaménagement des sites. Les autorisations d'exploiter doivent bien évidemment être compatibles avec le schéma.

- obligation de faire une déclaration de début d'exploitation ;
- interdiction d'extraire dans le lit mineur des cours d'eau ;
- interdiction d'extraire à moins de 35 m des rives d'un cours d'eau ;
- tenue de plans d'exploitation mis à jour au moins une fois par an ;
- obligation de faire le nécessaire en matière de prévention des risques de pollution des eaux et de l'air, et de nuisance par le bruit et les vibrations ;
- obligation de remettre en état après exploitation.

3.8. Maîtrise de la qualité

La qualité d'un granulats, c'est d'abord un niveau de spécification pour un usage donné, c'est ensuite le maintien de ce niveau de spécification dans le temps.

Pour le producteur, tout cela nécessite la connaissance de son gisement, la maîtrise de sa chaîne de production, la caractérisation de ses produits fabriqués, l'établissement d'une fiche technique de synthèse et d'engagement pour chacun d'eux, la mise en place et l'application d'un plan d'assurance qualité.

■ Depuis le 1er juin 2004, les normes européennes granulats harmonisées sont d'application obligatoire en France, les anciennes normes françaises étant retirées. En conséquence, le marquage CE des granulats entrant dans le champ de ces normes européennes est également devenu obligatoire à compter de cette date.

Trois normes européennes de spécifications des granulats intéressent plus particulièrement les domaines des chaussées et des bétons hydrauliques :

- NF EN 13242 Granulats pour matériaux traités aux liants hydrauliques et non traités ;
- NF EN 13043 Granulats pour mélanges hydrocarbonés et enduits superficiels ;
- NF EN 12620 Granulats pour bétons.

Ces normes européennes définissent des catégories ou classes pour chaque caractéristique de granulats, déterminées à partir d'essais européens normalisés.

Le marquage CE des granulats est issu du mandat M 125 que la Commission européenne a donné au Comité européen de normalisation.

Rappelons que le marquage CE des produits de construction permet de présumer la conformité des ouvrages vis-à-vis des exigences essentielles (stabilité et durabilité des

Granulats, origines et caractéristiques

ouvrages en particulier) de la directive européenne sur les produits de construction, mais dans la mesure seulement où ceux-ci sont correctement mis en œuvre.

À ce titre, le producteur est tenu d'appliquer un système de maîtrise de sa production, qui comprend notamment la réalisation d'essais initiaux de caractérisation et d'essais périodiques de vérification, ainsi que le traitement des non-conformités.

Le producteur a la responsabilité du marquage CE de ses granulats.

Il déclare qu'il maîtrise son système de production en appliquant toutes les dispositions prévues par les normes européennes granulats. Il établit ainsi une attestation de conformité, qui peut être :

- de niveau 4, s'il s'agit d'une simple déclaration de sa part ;
- de niveau 2+, si cette même déclaration s'appuie sur un audit d'inspection effectué par un organisme indépendant, notifié par un État membre.

Si le producteur peut choisir entre ces deux niveaux d'attestation de conformité pour mettre ses granulats sur le marché, les maîtres d'ouvrage tendent à imposer le niveau 2+.

Par ailleurs, si le marquage CE atteste d'un niveau de maîtrise du système de production, il ne peut seul constituer un gage de conformité des granulats aux spécifications d'usage d'un marché et n'exonère pas le maître d'ouvrage de la réalisation de ses contrôles.

■ De plus, la norme française expérimentale XP P 18-545 (Granulats – Éléments de définition, conformité et codification) d'application volontaire vient expliciter, préciser et compléter ce dispositif normatif européen, pour tenir compte du niveau d'exigence requis par les techniques actuelles d'une part, et du tissu industriel existant d'autre part.

Elle regroupe ainsi plusieurs caractéristiques sous forme de codes, eux-mêmes définis à partir de catégories européennes.

Elle introduit aussi la possibilité, pour les gravillons, d'utiliser sous certaines conditions une règle de compensation (entre résistance à la fragmentation et résistance à l'usure) et des critères de régularité granulométrique (tolérances à d et D), indispensables aux pratiques françaises courantes. Elle permet enfin de maintenir deux notions employées en France depuis de nombreuses années mais qui n'ont pas encore été reprises à l'échelon européen, à savoir les critères de conformité et d'acceptation et la fiche technique produit ou FTP, laquelle synthétise les valeurs spécifiées des caractéristiques normalisées du produit, que le producteur s'engage à respecter, et les résultats des essais les plus récents effectués par le producteur sur ce même produit.

Il existe en outre une marque NF granulats, qui est une certification française de produits, volontaire, fondée sur l'application des normes françaises et européenne précédemment

évoquées, et dont le droit d'usage est accordé et renouvelé par Afaq-Afnor-Certification, après un audit initial d'inspection et des audits périodiques de surveillance.

Elle prouve que les granulats sont conformes à ces normes, que les valeurs spécifiées de leurs caractéristiques ont été vérifiées et validées par un organisme indépendant et qu'elles sont effectivement respectées de façon continue par le producteur, donc que ces produits sont aptes à être utilisés pour l'usage prévu. Même si elle accroît la confiance du maître d'ouvrage, elle ne le dispense pas de contrôler de tels granulats certifiés.

La qualité d'une fourniture de granulats, c'est non seulement le respect des exigences du marché, mais c'est avant tout l'homogénéité des caractéristiques contrôlées. Cette régularité constitue d'ailleurs l'une des clés de la réussite du chantier.

Pour le maître d'ouvrage, tout cela implique de fixer des spécifications d'usage adaptées à ses propres besoins, d'utiliser des granulats répondant au mieux à ses critères de choix, et d'effectuer tous les contrôles nécessaires pour vérifier que les granulats sont conformes à son attente et ont en plus cette régularité tant recherchée.

3.9. Spécifications d'usage

- Domaine des chaussées

Les spécifications d'usage ont été fixées en fonction du trafic poids lourds, de la position de la couche considérée dans la structure de chaussée et de la technique routière utilisée pour sa réalisation (traitée ou non par un liant hydraulique ou hydrocarboné essentiellement).

Elles sont d'autant plus exigeantes que le trafic lourd est plus intense, que la couche est plus proche de la surface de la chaussée, que le liant est plus souple, que son dosage est plus faible et que son temps de prise est plus long, enfin que les propriétés mécaniques du produit routier employé sont plus faibles. Elles prennent aussi en compte une hétérogénéité possible des fournitures de granulats et un niveau courant d'aléas de chantier.

Ces spécifications d'usage ont été établies sur la base de résultats probants d'études en laboratoire et d'expérimentations sur chaussées, puis de bilans de comportement à long terme. Elles sont en outre confortées par l'expérience acquise grâce aux travaux de construction, de réhabilitation et d'entretien des routes et des autoroutes depuis plus de trente ans. Elles permettent de réaliser les chantiers dans de bonnes conditions et d'obtenir la qualité finale visée lorsque les exigences des marchés et des règles de l'art relatives à la fabrication et à la mise en œuvre des produits routiers, sont satisfaites.

Des spécifications d'usage pour les assises et les revêtements de chaussées sont suggérées dans la note d'information no 10 du Comité français pour les techniques routières (CFTR). Elles sont fondées sur les normes européennes et française granulats (§ 3) d'une part, et sont

calquées sur le standard existant pratiqué depuis maintenant plus de trois décennies d'autre part. L'objectif affiché est de guider les maîtres d'ouvrage dans leur choix. Rappelons que le CFTR regroupe des donneurs d'ordre et des professionnels, qui représentent l'ensemble de la communauté technique routière nationale de façon paritaire et partenariale.

Il résulte de tout cela que les spécifications d'usage conseillées pour les assises sont moins sévères que celles proposées pour les revêtements, lesquels nécessitent des granulats très résistants, concassés et peu polissables.

Par ailleurs, le recours à la règle de compensation entre les résistances à l'usure et à la fragmentation (cf. XP P 18-545) est généralement justifié par l'expérience technique régionale, avec le souci d'une utilisation rationnelle de la ressource sur le bassin susceptible d'alimenter le chantier, et la perspective d'une réduction des coûts de transport. De même, l'ajout de critères de régularité granulométrique est systématiquement motivé par la volonté de fabriquer et mettre en oeuvre des produits routiers de granularité constante.

- Assises

■ Pendant la phase de travaux, les diverses opérations de manutention, de stockage, de reprise, de fabrication et de mise en oeuvre, font subir aux granulats des frottements réciproques qui amènent une usure avec production de particules fines ; les granulats sont d'autant plus sensibles à cette attrition qu'ils sont plus anguleux, moins résistants et plus hétérogènes. Le compactage soumet en outre les granulats à des chocs répétés qui conduisent à une fragmentation avec formation d'éléments de toutes dimensions.

Après sa mise en service, la chaussée encaisse des sollicitations mécaniques dues en grande partie à la circulation des poids lourds ; les granulats évoluent alors différemment selon la technique routière mise en place.

Dans une assise non traitée par un liant hydrocarboné ou hydraulique, les granulats ne sont pas liés entre eux et subissent de ce fait, sous l'action agressive du trafic poids lourds, une fragmentation et une usure dans toute la masse de l'assise. Le phénomène d'attrition est d'autant plus important que la granularité du produit routier est plus creuse et sa compacité plus faible. L'attrition génère du sable et des fines, modifiant ainsi la granularité du produit routier ; cette évolution se fait toujours au détriment de la stabilité mécanique de l'assise, et peut aussi diminuer sa perméabilité.

L'emploi d'un liant hydrocarboné amène une liaison « souple », qui limite les mouvements relatifs des granulats mais ne les supprime pas.

Avec un liant hydraulique, après la prise, les granulats sont liés entre eux et ne se déplacent plus les uns par rapport aux autres.

Granulats, origines et caractéristiques

Cependant, la fissuration de l'assise traitée, due au retrait thermique, entraîne des frottements réciproques des granulats de part et d'autre des fissures, à chaque passage de poids lourds.

Elle favorise en outre l'infiltration de l'eau, ce qui accélère encore l'attrition.

■ La recherche d'économies dans les projets impose d'utiliser au mieux les matériaux disponibles localement, en ayant recours au besoin à des granulats encore mal connus donc peu employés dans les produits routiers parce que ne répondant pas forcément à des spécifications d'usage de maîtres d'ouvrage. Leur utilisation se justifie aussi par l'épuisement de certaines ressources classiques et par les exigences accrues en matière de protection de l'environnement.

De tels granulats non traditionnels ne peuvent cependant être utilisés que si des résultats d'études et d'expérimentations préalables permettent d'évaluer les risques encourus avec précision.

De plus, leur emploi ne doit en aucun cas se traduire par un abaissement quelconque de la qualité finale des assises ; en d'autres termes, cette qualité finale doit impérativement être la même quel que soit le niveau de performance des granulats entrant dans la composition des produits routiers. L'utilisation de ces granulats non traditionnels implique par ailleurs une parfaite maîtrise de leur homogénéité ainsi qu'une bonne connaissance de leurs limites et précautions d'emploi. Elle nécessite aussi la mise au point de méthodes spécifiques adaptées à leurs caractéristiques géotechniques, en jouant par exemple sur les propriétés mécaniques des produits routiers et sur le dimensionnement des assises voire des structures de chaussées. Elle impose enfin des conditions particulières de chantier et des sujétions supplémentaires de mise en œuvre, qui permettent d'obtenir la qualité finale visée et de réduire au maximum les risques encourus.

Le CFTR a mis en place une méthodologie de valorisation et de promotion d'un granulat non traditionnel local. Elle consiste à identifier le facteur de risque, à évaluer ce risque par des expérimentations sur chaussées suivies dans le temps, puis à diffuser les résultats obtenus sous forme de guide technique régional. Ce guide doit renseigner principalement sur les caractéristiques géotechniques du granulat en question, ses utilisations possibles, ainsi que sur les conditions, limites et précautions particulières d'emploi.

Le fait que ces éléments d'information aient été déduits de tests en vraie grandeur incite à penser que les risques encourus sont maîtrisables dès lors que la procédure qualité est strictement appliquée.

L'initiative de la démarche et l'élaboration du guide sont du ressort des parties prenantes de l'échelon local concerné, le CFTR validant le projet avant sa publication ; cette validation

consiste à vérifier la méthode appliquée, le contenu du document, ainsi que la fiabilité et la cohérence des préconisations par rapport au référentiel technique retenu. Il existe aujourd'hui plusieurs guides techniques régionaux de ce type ; des assises ont même été réalisées dès leur parution, conformément à leurs recommandations pratiques.

Mais il ne faut pas oublier que plus on assouplit une spécification d'usage, plus on se rapproche du seuil limite qu'il est impératif de ne jamais franchir, et par conséquent, plus la caractéristique contrôlée doit être homogène et plus la surveillance doit être renforcée ; c'est un peu « l'histoire de la tentation marginale vers la réalité scientifique ».

-Revêtements

Les granulats pour couche de roulement doivent remplir trois fonctions :

— rester dans le produit routier que l'on a choisi de mettre en place ; c'est le rôle de la granularité, de la forme, de l'angularité et de la propreté vis-à-vis notamment de la stabilité immédiate ; c'est aussi le problème de l'adhésivité avec le liant vis-à-vis principalement de la tenue dans le temps ;

— se maintenir dans leur intégrité là où ils sont, donc conserver toutes leurs propriétés aussi longtemps que possible ; c'est le rôle essentiel de la résistance mécanique exprimée en termes de résistance à la fragmentation et de résistance à l'usure ;

— assurer de bonnes caractéristiques antidérapantes, ce qui fait intervenir la granularité, la forme et l'angularité, pour la macrotexture de la surface routière d'une part, et la résistance au polissage pour la microtexture de celle-ci d'autre part, la résistance au polissage étant liée aux aspérités de surface des gravillons ou microrugosité.

Si la granularité et la forme des granulats, la formule et la mise en oeuvre du revêtement influencent l'obtention d'une surface initiale antidérapante, la résistance mécanique, l'angularité et la microrugosité jouent un rôle important dans son évolution sous l'action du trafic poids lourds. La fragmentation maintient l'angularité et la microrugosité mais fait disparaître rapidement les gravillons.

L'usure diminue progressivement l'angularité et augmente les surfaces susceptibles de se polir. Il faut donc trouver des gravillons et des conditions d'utilisation pour lesquels la fragmentation et l'usure soient réduites au maximum et pour lesquels le poli ne puisse se développer.

Plus une roche contient de minéraux durs, plus elle est difficile à polir ; seuls les minéraux tendres atteignent un bon poli. Il en résulte que les roches riches en calcite se polissent très vite, les roches riches en feldspaths moyennement vite et les roches riches en quartz pratiquement pas, abstraction faite de leur structure.

Granulats, origines et caractéristiques

Lorsqu'une roche contient des minéraux de duretés différentes, il y a toujours une usure différentielle laissant les plus durs en relief et les plus tendres en creux. On obtient alors une microrugosité limite qui n'est jamais un bon poli. La roche idéale serait composée pour moitié de minéraux durs et pour moitié de minéraux tendres.

Il existe cependant une contradiction entre résistance au polissage et résistance mécanique, l'une s'obtenant toujours au détriment de l'autre : c'est la présence de minéraux tendres parmi des minéraux durs qui favorise une bonne résistance au polissage, mais fait alors chuter fortement la résistance mécanique.

De même, lorsque la porosité d'une roche croît, sa résistance au polissage augmente mais sa résistance mécanique diminue.

Les roches ayant simultanément d'excellentes résistances à la fragmentation, à l'usure et au polissage sont rares : la résistance à la fragmentation des quartzites, la résistance à l'usure des microdiorites et la résistance au polissage des basaltes ne sont pas toujours très bonnes. De façon générale, on constate qu'une structure fine et une porosité faible confèrent une résistance mécanique forte. Mais pour les roches à résistance mécanique élevée et à faible contraste de dureté des minéraux, on arrive fréquemment à un mauvais état de poli final.

- Domaine des bétons

Pour les bétons de chaussées, des spécifications d'usage figurent aussi dans la note d'information no 10 du CFTR, à titre de suggestion.

Pour les bétons destinés aux bâtiments et aux ouvrages de génie civil, c'est à l'acquéreur de granulats qu'il appartient de définir ces spécifications d'usage dans son cahier des charges, en fonction du type de construction, de la qualité du béton et de divers risques d'exposition. Pour ce faire, il utilise les prescriptions de la norme française XP P 18-545, laquelle s'appuie sur la norme européenne NF EN 12620.

Là encore, l'homogénéité des caractéristiques des granulats est essentielle, et en particulier la régularité de la granularité des sables.

De plus, si l'angularité des granulats ne conditionne qu'assez faiblement et indirectement la résistance du béton durci, en revanche elle a une très forte influence sur la maniabilité du béton frais, ce qui incite les entreprises de mise en oeuvre à utiliser préférentiellement des granulats alluvionnaires roulés, aux formes arrondies. Il n'en demeure pas moins vrai que dans les régions pauvres en matériaux alluvionnaires, on sait formuler des bétons à base de granulats concassés, anguleux donc à arêtes vives, moyennant notamment l'incorporation d'additifs voire d'adjuvants particuliers.

Par ailleurs, certains minéraux peuvent dégrader les bétons :

Granulats, origines et caractéristiques

- les variétés amorphes de la silice (opale, calcédoine) et les phases vitreuses siliceuses, peuvent générer des désordres dus à l'alcali-réaction avec les alcalins du ciment ;
- le gypse et la pyrite sont susceptibles de produire des réactions sulfatiques ;
- les argiles sont parfois responsables de gonflements par réaction avec d'autres éléments ;
- la présence d'oxydes de fer et l'oxydation de pyrites tendent à développer des taches de rouille sur les parements.

En outre, l'utilisation de silex, dans une gamme de teneurs pessimales, peut occasionner des désordres dus à l'alcali-réaction. Enfin, la subsistance de plâtre dans les matériaux de démolition est susceptible de générer des gonflements par réaction avec d'autres éléments.

3.10 - Conclusion

Les granulats représentent, en poids et en volume, la part la plus importante des bétons hydrauliques et des produits routiers.

De par ce fait, c'est assez largement à eux qu'il incombe d'assumer les performances mécaniques de ces matériaux de construction, sans perdre de vue le rôle essentiel du liant qui est de les maintenir en place.

Les caractéristiques des granulats dépendent de la nature et de la qualité du matériau d'origine d'une part, et de leurs conditions d'exploitation et d'élaboration d'autre part.

Les propriétés géométriques et de propreté peuvent être considérablement améliorées en mettant en œuvre des méthodes d'extraction, de fragmentation et de classement appropriées, alors que les propriétés intrinsèques ne peuvent être que peu influencées par la fabrication. L'homogénéité de toutes ces caractéristiques, c'est-à-dire la régularité des fournitures de granulats, constitue l'objectif prioritaire que tout producteur doit viser et que tout maître d'ouvrage doit vérifier.

L'évocation de l'origine d'une ressource ne suffit pas à en définir les usages. Au sein d'une famille, les caractéristiques géotechniques peuvent en effet être très différentes.

De même qu'autrefois, les hommes sélectionnaient les matériaux les plus aptes à la réalisation des ouvrages, en ayant recours aux règles de l'art de leur époque (« le sable doit crisser dans la main », « le pavé doit rendre un son clair au marteau »), aujourd'hui, les ingénieurs imposent des exigences contraignantes aux granulats, portant sur des propriétés très diverses fonction du type d'emploi, et fondées sur des essais conventionnels normalisés.

Les spécifications d'usage actuelles tendent généralement à concilier le souhaitable et le possible, les impératifs techniques et les contraintes économiques, dans le cadre d'une gestion optimale des ressources existantes et potentielles au mieux des intérêts de la collectivité, et dans un souci de développement durable.