

# Granulats. Origines et caractéristiques

par Pierre DUPONT

*Ingénieur CNAM*

*Expert responsable du domaine des granulats au SETRA (Service d'Études Techniques des Routes et Autoroutes)*

Georges AUSSÉDAT

*Responsable des affaires techniques à l'Union Nationale des Producteurs de Granulats*

Yannick DESCANTES

*Docteur en Génie Civil. Ingénieur des Travaux Publics de l'État*

*Responsable de l'activité essais de granulats au Laboratoire central des Ponts et Chaussées*

et Jeanne-Sylvine GUEDON

*Docteur en pétrographie-volcanologie. Ingénieur des Travaux Publics de l'État*

*Chef de la section Géologie, Mécanique des Roches et Géotechnique de l'Environnement au Laboratoire Central des Ponts et Chaussées*

1.	Principales ressources.....	C 902v2 - 2
1.1	Granulats naturels .....	— 2
1.2	Granulats artificiels ou recyclés .....	— 3
2.	Propriétés des roches exploitées.....	— 3
2.1	Minéraux de base .....	— 3
2.2	Roches magmatiques .....	— 4
2.3	Roches sédimentaires .....	— 5
2.4	Roches métamorphiques .....	— 5
3.	Principales caractéristiques géotechniques des granulats et essais correspondants.....	— 6
3.1	Caractéristiques de fabrication.....	— 6
3.2	Caractéristiques intrinsèques .....	— 9
	Références bibliographiques .....	— 12
	Pour en savoir plus.....	Doc. C 903v2

**L**es granulats constituent une matière première indispensable au bâtiment et au génie civil, sans laquelle la réalisation des ouvrages serait aujourd'hui impossible dans l'état actuel des techniques de construction. Ils forment notamment le **squelette des bétons hydrauliques**, l'**ossature des couches de chaussées**, et de leur qualité dépend en grande partie celle des logements, des ouvrages d'art et des routes.

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 t. Ils sont désignés par leur plus petite et plus grande dimensions  $d$  et  $D$ , l'intervalle  $d/D$  étant appelé **classe granulaire**. Cette désignation admet que les 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  $2 \leq D \leq 6,3$  mm ;
- les **gravillons**, où  $d \geq 1$  mm et  $2 \leq D \leq 90$  mm ;
- les **graves**, où  $d = 0$  et  $2 \leq D \leq 90$  mm .

Les  **fines**  constituent la fraction granulaire passant 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/m<sup>3</sup>.*

*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.*

*Dans ce dossier [C 902v2], nous traitons des origines et des caractéristiques des granulats. Dans un deuxième dossier [C 903v2], nous traitons de la production des granulats, de la protection de l'environnement, de la maîtrise de la qualité, des spécifications d'usage et du marché des granulats en France.*

*Les normes, ouvrages à consulter et principaux fournisseurs sont regroupés en [Doc. C 903v2].*

## 1. Principales ressources

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.

### 1.1 Granulats naturels

La géologie de la France conditionne l'emplacement des aires de production en fonction de la nature des terrains. Elle offre une grande richesse et une grande diversité de formations, ce qui se traduit par une large variété de 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.

#### 1.1.1 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 ter-

restre 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 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 roches massives éruptives apparaissent dans les massifs anciens (massif armoricain, massif central, massif vosgien) et les chaînes plissées récentes (chaîne alpine, chaîne pyrénéenne).

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.

#### 1.1.2 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 quartziteux 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.

### 1.1.3 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, criblage 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 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 fluviales 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 paléo-géographiques, et qui se retrouvent actuellement émergés sur des étendues et des épaisseurs variables (sables du Perche, sables de Fontainebleau, etc.).

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.).

## 1.2 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).

## 2. 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.

### 2.1 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.

#### 2.1.1 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/mm<sup>2</sup>), 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 altérables, moyennement durs (750 kg/mm<sup>2</sup>), 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/mm<sup>2</sup>), 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 ( $710 \text{ kg/mm}^2$ ), 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 ( $730 \text{ kg/mm}^2$ ), 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 ( $800 \text{ kg/mm}^2$ ), 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 (andalouite, disthène, sillimanite) et les silicates alumineux ferro-magnésiens (cordiérite, staurolite), ont leurs tétraèdres unis entre eux par des ions aluminium. Ce sont des minéraux stables, très caractéristiques des roches métamorphiques.

## 2.1.2 Minéraux non silicatés

Les **carbonates** sont nombreux mais seuls deux d'entre eux sont importants. La **calcite** est un carbonate de calcium, très tendre ( $110 \text{ kg/mm}^2$ ), 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 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 ( $350 \text{ kg/mm}^2$ ), 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 ( $75 \text{ kg/mm}^2$ ), 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 ( $1\,050 \text{ kg/mm}^2$ ), de couleur jaune d'or et à éclat métallique. Elle est accessoire dans toutes les roches.

## 2.2 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 1, 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.

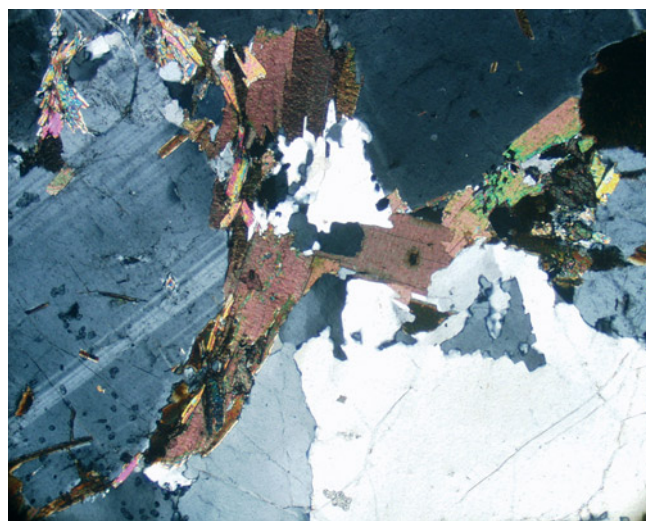


Figure 1 – Lame mince dans un granite (x 50)

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.

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 micro-litique 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 (serpentes).

Les **basaltes** sont des roches volcaniques très communes (figure 2), à structure microlitique voire vitreuse dans certains cas, à aspect compact mais quelquefois vacuolaire. La plupart sont très résistants mais sensibles au polissage.



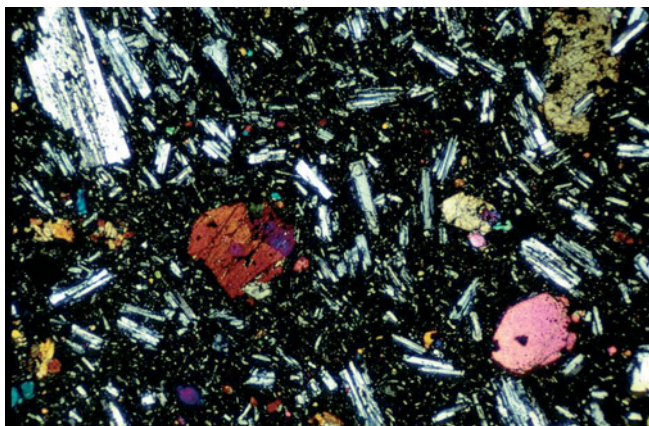


Figure 2 – Lame mince dans un basalte (× 50)

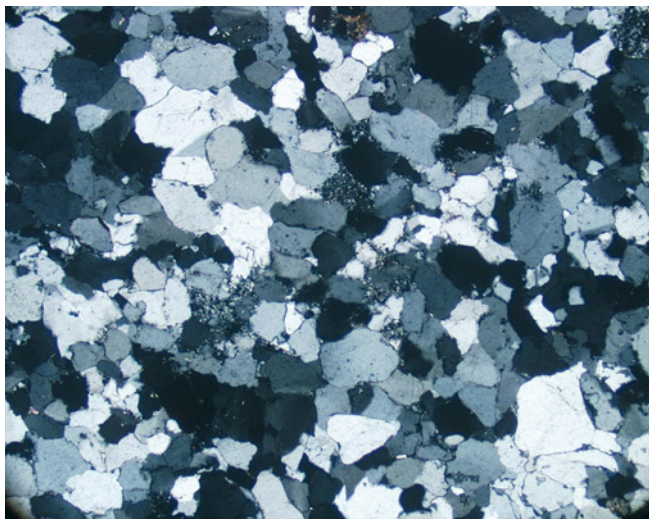


Figure 3 – Lame mince dans un grès (× 50)

## 2.3 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). 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 4). 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).

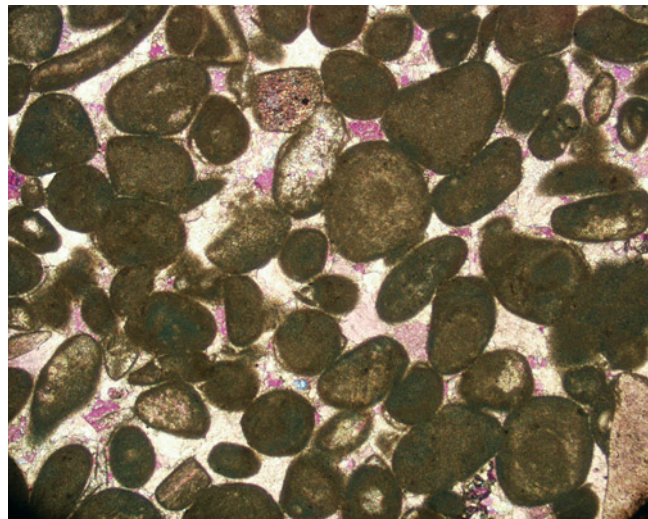


Figure 4 – Lame mince dans un calcaire oolithique (× 50)

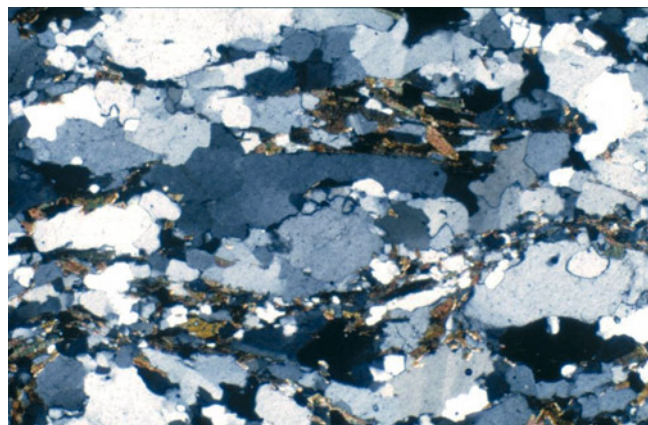


Figure 5 – Lame mince dans un gneiss (× 50)

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.

## 2.4 Roches métamorphiques

Les **gneiss** résultent de la transformation des granites (figure 5). 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





Figure 6 – Lame mince dans une amphibolite (x 50)

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 6). Ce sont des roches très dures à texture massive et de teinte sombre. Elles sont constituées essentiellement de cristaux d'amphiboles visibles à l'œil 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. Principales caractéristiques géotechniques des granulats et essais correspondants

Toute ressource, qu'elle soit d'origine naturelle, artificielle ou recyclée, ne permet pas nécessairement d'élaborer des granulats valorisables. En effet, l'ampleur du trafic routier comme le niveau de performance exigé pour les bâtiments et les ouvrages d'art imposent l'emploi de granulats de qualité, pour assurer la stabilité et la durabilité des ouvrages. Or, la qualité dont il s'agit repose sur des critères principalement liés à des caractéristiques intrinsèques à la ressource utilisée ainsi qu'à des caractéristiques dépendant de l'élaboration des granulats.

Ces caractéristiques sont mesurées à l'aide d'essais, dont la plupart font désormais l'objet de normes européennes (séries NF EN 932-XX, 933-XX, 1097-XX, 1367-XX, 1744-XX) et quel-

ques-uns de normes françaises non européennes. En outre, ces essais sont réalisés sur des prélèvements de taille souvent dérisoire par rapport aux volumes de granulats entrant dans la fabrication des matériaux de construction, aussi est-il fondamental de veiller à la représentativité des échantillons à tester en respectant les procédures normalisées d'échantillonnage et de division d'échantillon (NF EN 932-1 et 932-2).

**Nota :** Concernant la **normalisation**, le lecteur se reportera en [Doc. C 903v2].

Les paragraphes qui suivent présentent les principales caractéristiques des granulats à déterminer ainsi que les méthodes d'essai correspondantes, avec un regard critique ayant parfois conduit à développer des méthodes « modernes ».

Certaines méthodes d'essai européennes, relativement nouvelles par rapport aux pratiques françaises antérieures ou présentant des adaptations significatives, font l'objet d'explications complémentaires, voire de recommandations dans deux fascicules de documentation nationaux (FD P 18-662 et 18-663). Sauf mention contraire explicite, l'échantillonnage et la division d'échantillon sont systématiquement effectués conformément aux normes européennes, et les granulats sont toujours lavés et séchés avant essais.

#### 3.1 Caractéristiques de fabrication

Elles regroupent principalement les caractéristiques géométriques des granulats, qui peuvent être maîtrisées au stade de l'élaboration. Les caractéristiques faisant l'objet de spécifications en France sont la granularité, l'aplatissement, l'angularité et la qualité des fines.

La **granularité** désigne la distribution dimensionnelle des particules d'un granulat. Elle constitue sans doute la caractéristique géométrique la plus importante, car elle permet d'ajuster la compacité d'un mélange (volume de matière rapporté au volume total occupé par le mélange), paramètre influençant nombre de propriétés des bétons hydrauliques et des produits routiers parmi lesquelles la teneur en liant. En outre, une proportion élevée de petits éléments (fines) dans un mélange augmente sa sensibilité à l'eau, ce qui réduit sa résistance mécanique et sa résistance au gel-dégel.

L'**aplatissement** est caractérisé par la proportion pondérale de particules plates d'un granulat. Son accroissement a pour effet de réduire la compacité d'un mélange. Un aplatissement élevé est aussi particulièrement préjudiciable aux enduits superficiels (gravillonnage), dans la mesure où la faible épaisseur des particules engendre un excès relatif de liant à l'origine d'une perte d'adhérence.

L'**angularité** est une caractéristique globale, qui désigne à la fois le caractère plus ou moins aigu des angles entre les faces limitant les particules, l'état plus ou moins émoussé des arêtes délimitant ces faces et l'état plus ou moins rugueux de ces faces. Elle est mesurée exclusivement sur les gravillons d'origine alluvionnaire, arrondis par leur transport naturel au cours de leur histoire géologique, et sur les sables de toute origine. À l'image du vacancier dont les pieds s'enfoncent dans le sable de la plage, un défaut d'angularité accroît la déformabilité par cisaillement des enrobés hydrocarbonés et des assises de chaussées non traitées, au détriment de leur stabilité. Une faible angularité est parfois recherchée, comme c'est le cas avec les bétons d'ouvrages d'art, car elle augmente leur maniabilité à l'état frais au bénéfice de leur mise en œuvre entre des armatures métalliques.

La **qualité des fines** désigne essentiellement leur teneur en substances argileuses, celles-ci présentant de nombreux inconvénients, parmi lesquels des gonflements par absorption d'eau ou par réaction chimique avec d'autres substances du mélange (béton notamment), ainsi qu'une surface spécifique susceptible de croître fortement en fonction notamment du pH du milieu au point de faire écran entre le liant et les granulats.

### 3.1.1 Granularité (NF EN 933-1)

L'essai de référence européen pour l'analyse granulométrique consiste à séparer, au moyen d'une colonne de tamis, un échantillon en plusieurs classes granulaires de dimensions décroissantes. Cet essai s'applique aux granulats passant au tamis à maille de dimension 90 mm (tamis de 90 mm). Les tamis utilisés sont tous à mailles carrées, dont les dimensions (ouverture nominale) commencent à 0,063 mm et appartiennent à la série géométrique R20 de raison  $20/\sqrt{10} \approx 1,12$  (normes NF EN 933-2). En-deçà de 4 mm, leur maillage est réalisé en fils tissés, tandis qu'il l'est en tôles perforées à partir de 4 mm et au-delà. L'échantillon à tester, dont la masse minimale imposée augmente avec la grosseur des plus gros éléments pour disposer d'un nombre suffisant de particules, est séché, pesé, lavé sur un tamis de 0,063 mm, puis de nouveau séché et pesé. Il est ensuite tamisé dans une colonne, dont l'ouverture nominale des tamis est décroissante du haut vers le bas. Le choix des tamis de la colonne dépend de la fraction granulométrique testée et il est généralement imposé. Le résultat est une courbe granulométrique (figure 7) exprimant, pour chaque dimension de tamis représentée en abscisse, la proportion massique (%) de l'échantillon de granulat passant à travers ce tamis rapportée à la masse sèche initiale de l'échantillon. À cet égard, la proportion massique de passant au tamis de 0,063 mm (appelée « fines » et définissant la « propreté ») intègre les éléments éliminés lors du lavage initial de l'échantillon.

Un producteur de granulats suit la régularité granulométrique de chacun des produits  $d/D$  qu'il commercialise grâce à trois fuseaux, chaque fuseau étant défini comme une zone délimitée par deux courbes granulométriques enveloppe :

- le **fuseau de fabrication** désigne une zone contenant 95 % des courbes granulométriques caractéristiques de la production sur une période donnée récente ;
- le **fuseau de régularité**, dont l'étendue est imposée mais la valeur centrale choisie par le producteur, doit contenir au moins 90 % du fuseau de fabrication ; il constitue en outre l'engagement du producteur dans les marchés ;
- le **fuseau de spécifications** coïncide avec les limites de catégories définies dans les normes européennes granulats et doit contenir le fuseau de régularité dans son intégralité.

L'essai de référence qui vient d'être décrit présente plusieurs inconvénients : il est long, peu fidèle, fastidieux et susceptible d'altérer la santé du personnel d'essais (charges lourdes, poussières, etc.). Aussi, des techniques alternatives se sont développées à travers le monde. Nombre d'entre elles reposent sur un **procédé optoélectronique**, consistant à capturer des images des particules selon une ou plusieurs direction(s), puis à réaliser des traitements mathématiques permettant de tracer une courbe granulométrique. En France, un appareil reposant sur ce procédé et baptisé vidéogranulomètre mlpc<sup>®</sup> a été mis au point et a fait l'objet d'améliorations constantes depuis le début des années 1980 [1]. Cet appareil, répondant aux exigences de la norme XP P 18-566, est représenté sur la figure 8. L'essai consiste à introduire un échantillon de particules refusées au tamis de 1 mm et passant au tamis de 63 mm dans la trémie de l'appareil, puis les particules sont dispersées et positionnées sur leur plus grande surface par le couloir vibrant, enfin elles sont précipitées en chute libre dans la zone d'analyse par le tambour. Pendant sa chute à travers la zone d'analyse, chaque particule intercepte le faisceau lumineux éclairant les cellules photosensibles d'une caméra, ce qui permet de scanner son ombre en temps réel. Un algorithme reconstitue alors la géométrie de l'ombre de chaque particule par assemblage des segments issus du scan. Enfin, en assimilant chaque particule à un ellipsoïde de révolution, il est possible de calculer la longueur de ses axes, son volume, et de représenter une courbe granulométrique en volume cumulé des particules analysées. Si la courbe obtenue diffère du résultat d'analyse par tamisage, une correspondance de très bonne qualité peut néanmoins être établie à l'échelle d'une carrière.

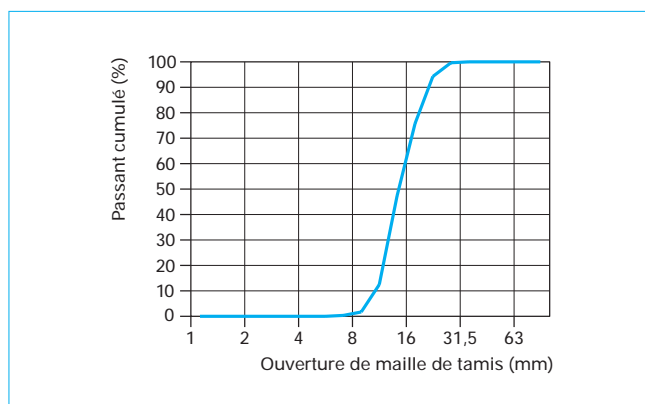


Figure 7 – Courbe granulométrique d'un granulat de fraction 10/20 mm

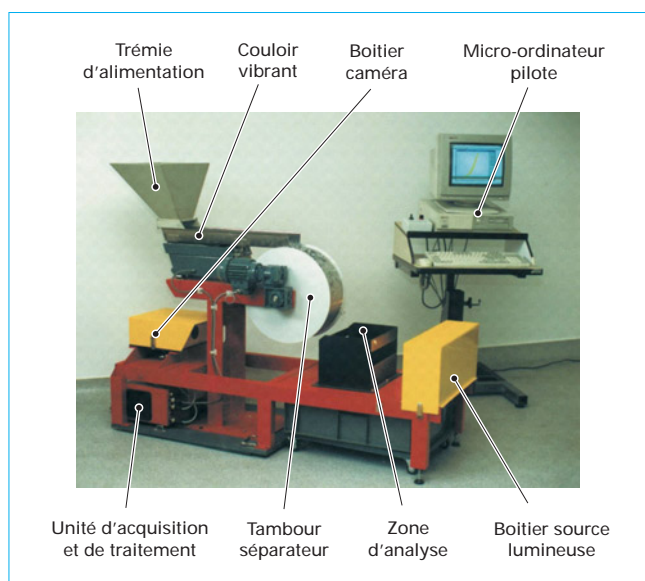


Figure 8 – Vue du vidéogranulomètre mlpc<sup>®</sup>

Pour le **cas particulier des enrochements** (norme NF EN 13383-2), dont les dimensions vont bien au-delà de 90 mm, des tamis constitués de barres formant des mailles carrées d'ouverture nominale 63 – 90 – 125 – 180 – 250 et 360 mm sont utilisés pour les petits enrochements, tandis qu'une méthode par pesée est employée pour les enrochements moyens ( $\leq 300$  kg) et pour les gros enrochements (de 300 kg à 15 t).

Inversement, pour le **cas particulier des fines**, dont les dimensions peuvent être de quelques micromètres (cas des argiles, par exemple), la granulométrie nécessite d'avoir recours à des méthodes indirectes appliquées à un échantillon non lavé, parmi lesquelles figurent l'analyse par granulométrie laser et la sédimentométrie.

### 3.1.2 Aplatissement (NF EN 933-3)

L'essai de référence européen pour déterminer l'aplatissement, ou la forme, des granulats est la mesure du coefficient d'aplatissement. Il consiste à séparer par tamisage un échantillon  $d/D$  de granulats en fractions élémentaires, puis à extraire dans chaque fraction les particules plates au moyen de grilles à fentes. Le

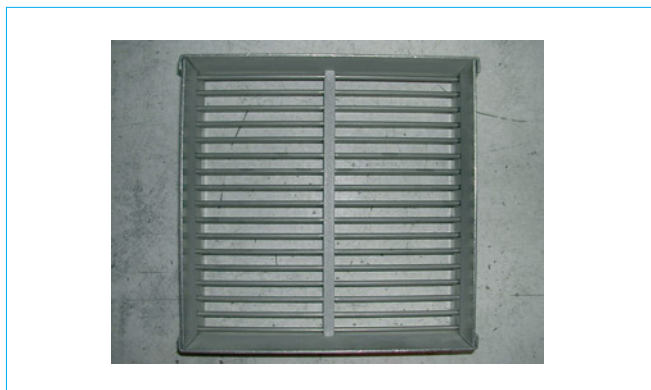


Figure 9 – Grille à fentes

domaine d'application et la masse minimale d'échantillon à tester sont identiques à ceux définis pour la granulométrie par tamisage (§ 3.1.1). Les fractions élémentaires sont obtenues en utilisant une série de tamis dont les dimensions des mailles vont de 4 à 80 mm en suivant une progression géométrique de raison  $10^{1/10} \approx 1,25$ . Chaque fraction élémentaire  $d_i/D_i$  est ensuite tamisée au moyen d'une **grille à fentes**, dont les barreaux ont un écartement de  $D_i/2$  (figure 9). Si  $M_1$  désigne la masse initiale de l'échantillon et  $M_2$  la masse cumulée de particules de chaque fraction élémentaire  $d_i/D_i$  passant à travers la grille à fentes d'écartement  $D_i/2$ , le **coefficient d'aplatissement FI** est donné par l'équation suivante :

$$FI (\%) = 100 M_2/M_1$$

Un granulat est d'autant plus isotrope que ce coefficient  $FI$  est faible. Le coefficient d'aplatissement peut également être mesuré par méthode optique. Les travaux de thèse de M.N. Bouquety [2] exposent et valident la méthode.

### 3.1.3 Angularité (NF EN 933-5 et 933-6)

Les essais de référence européens pour mesurer l'angularité sont, pour les granulats retenus au tamis de 4 mm, le comptage manuel de faces cassées et, pour les granulats passant au tamis de 4 mm, la mesure du temps d'écoulement dans un angulomètre à sable.

■ Le **comptage manuel des faces cassées** consiste en un tri visuel des particules d'un échantillon en quatre catégories :

- celles présentant plus de 90 % de leur surface concassée (dites « entièrement concassées ») ;
- celles présentant entre 50 et 90 % de leur surface concassée (dites « semi-concassées ») ;
- celles présentant entre 10 et 50 % de leur surface concassée (dites « semi-roulées ») ;
- celles présentant moins de 10 % de leur surface concassée (dites « entièrement roulées »).

La taille de l'échantillon dépend de son  $D$ . À l'issue du tri, les proportions pondérales de particules de chaque catégorie rapportées à la masse totale de l'échantillon sont déterminées.

■ La procédure d'essai qui vient d'être exposée présente l'inconvénient d'être longue, fastidieuse et de conduire à des résultats très variables d'un opérateur à l'autre. Aussi, pour des gravillons de fraction granulaire comprise entre 4 et 20 mm, un essai d'écoulement à l'aide de l'**angulomètre à gravillons** représenté sur la figure 10 lui est souvent préféré. L'essai consiste à introduire environ 10 kg de gravillons dans le tube porte-échantillons de l'appareil, puis à mesurer le temps d'écoulement, sous l'effet d'une vibration entretenue, de 7 kg à travers une trappe calibrée sitôt le régime d'écoulement quasi-stationnaire atteint. Le résultat brut

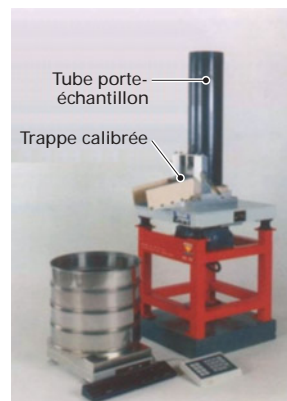


Figure 10 – Angulomètre à gravillons



Figure 11 – Angulomètre à sable mlpc® (à droite) et alimentateur prototype (à gauche)

d'essai est le temps moyen  $E_{cm}$  de cinq répétitions d'écoulement de l'échantillon. Mais pour s'affranchir d'une légère dérive des réglages de l'appareil, ce résultat brut est corrigé par le temps d'écoulement  $E_r$  mesuré dans les mêmes conditions sur un granulat de référence, dont le temps d'écoulement théorique est fixé à 100 s. Ainsi le **temps d'écoulement  $E_{cg}$**  d'un échantillon est donné par la formule suivante :

$$E_{cg} (s) = E_{cm} + (E_r - 100)$$

Un gravillon est d'autant plus anguleux, et plus frottant, que ce temps d'écoulement  $E_{cg}$  est long. Il n'existe malheureusement pas de loi générale de passage de la proportion de faces cassées au temps d'écoulement des gravillons, notamment en raison de la dispersion de la première ; cependant, un calage peut être effectué pour un site de production de granulats donné.

■ La mesure du temps d'écoulement d'un sable consiste à chronométrer le temps que met environ 1 kg de particules à s'écouler à travers l'ouverture circulaire calibrée d'un **angulomètre à sable**, tel que celui représenté sur la figure 11. L'échantillon est de fraction



0,063/2 (ouverture calibrée de diamètre 12 mm) ou 0,063/4 mm (ouverture calibrée de diamètre 16 mm), la fraction inférieure à 0,063 mm étant éliminée par tamisage pour ne pas bloquer l'écoulement. Le résultat d'un essai est la moyenne de cinq répétitions d'écoulement de l'échantillon. La mauvaise reproductibilité de cet essai par ailleurs très répétable a été corrigée en France grâce à l'incorporation d'un alimentateur prototype (figure 11).

L'angularité peut également être mesurée par un appareil optique tel que le **vidéogranulomètre**. En effet, si l'œil humain est capable de reconnaître des faces cassées, le traitement d'images de particules permet également de le faire avec une précision bien meilleure. Les travaux de Y. Descantes *et al.* illustrent l'efficacité d'une approche optique de l'angularité pour les gravillons alluvionnaires [3] et les ballasts de voies ferrées [4].

### 3.1.4 Qualité des fines (NF EN 933-8 et 933-9)

Elle est mesurée à l'aide des essais européens d'équivalent de sable ou de bleu de méthylène, effectués sur des sables non lavés.

■ **L'essai d'équivalent de sable** est réalisé sur environ 120 g de la fraction 0/2 mm des sables et graves dans leur état naturel (ni lavage, ni séchage). Il consiste à introduire un échantillon dans une éprouvette graduée de dimensions normalisées, puis à séparer les fines des éléments plus grossiers par immersion de l'échantillon dans une solution floculante de chlorure de calcium et agitation. Après un repos de 20 min, pendant lequel les éléments qui le peuvent sédimentent, la hauteur de sédiment  $h_2$  et la hauteur totale sédiment plus floculat  $h_1$  sont mesurées (figure 12). L'**équivalent de sable ES** est donné par la formule suivante :

$$ES (\%) = 10 \frac{h_2}{h_1}$$

La qualité des fines d'un sable est d'autant meilleure qu'elles sédimentent, donc que cette valeur **ES** est élevée. La rapidité et la simplicité de cet essai lui confèrent un intérêt incontestable ; cependant, il présente le défaut majeur de pénaliser les sables à forte teneur en fines naturelles largement utilisés en France dans les matériaux de construction. En effet, la mise en suspension des fines argileuses est biaisée par celle des fines inertes, c'est-à-dire qui n'ont pas la nocivité des argiles en termes de capacité à gonfler ou à accroître leur surface spécifique ; il serait donc souhaitable de faire évoluer la norme en réduisant la teneur en fines naturelles de la fraction testée.

■ En attendant, il est possible de réaliser **l'essai de valeur de bleu**, plus sélectif que le précédent vis-à-vis des argiles.

L'essai est réalisé sur la même fraction granulaire et consiste à doser l'adsorption du bleu de méthylène par l'argile contenue dans 200 g de sable mis en suspension dans de l'eau distillée. La mise en suspension est réalisée à l'aide d'un agitateur à ailettes, dont la vitesse de rotation est normalisée. Après chaque injection d'une dose de bleu de méthylène, une goutte de la suspension est prélevée puis déposée sur un papier filtre. Le dosage est arrêté lorsque la tache obtenue sur le papier filtre fait apparaître une auréole teintée de bleu, signe de la présence de bleu de méthylène non adsorbé dans la solution.

La valeur de bleu **MB** s'exprime alors en centimètre cube de bleu de méthylène par gramme de sable. Plus cette valeur **MB** est faible et moins les fines du sable sont nocives. L'essai peut également être réalisé sur la fraction 0/0,125 mm, en raisonnant sur 30 g, et la valeur de bleu est alors désignée par le symbole  $MB_F$ .

## 3.2 Caractéristiques intrinsèques

Elles regroupent les caractéristiques mécaniques, chimiques, thermiques et d'altérabilité héritées de la ressource dont proviennent les granulats, ainsi qu'une partie des caractéristiques physiques (masse volumique réelle et coefficient d'absorption d'eau).

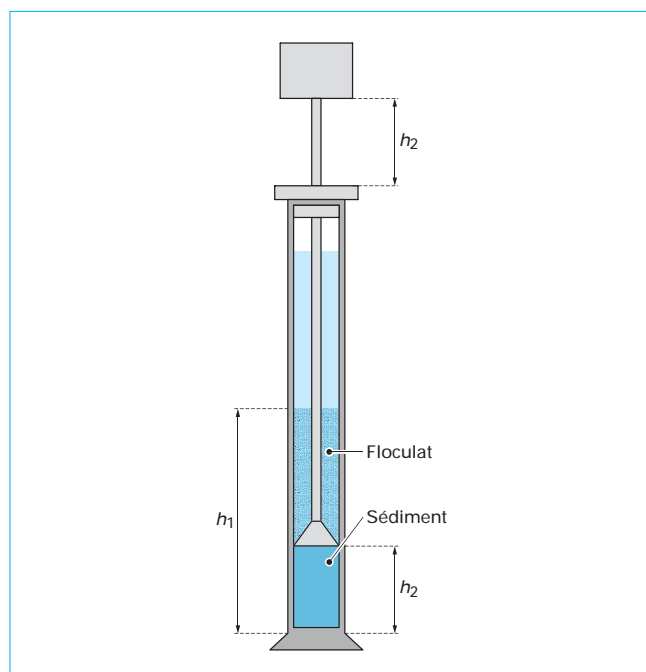


Figure 12 – Éprouvette de l'essai d'équivalent de sable

Les caractéristiques mécaniques mesurées sur les granulats sont liées aux sollicitations qu'ils subissent durant les phases d'élaboration, de stockage, de transport, de mise en œuvre et de service au sein des matériaux de construction. Ces sollicitations sont principalement de trois types :

- la **fragmentation par chocs**, due par exemple au passage d'un essieu de camion roulant à l'aplomb d'une tranche verticale d'un revêtement routier en enrobé hydrocarboné ;
- l'**usure par attrition entre particules granulaires**, se produisant par exemple pendant la phase de malaxage en centrale d'une grave traitée au liant hydraulique ;
- le **polissage de la surface des particules**, lié notamment à l'action des pneumatiques des véhicules sur les granulats de la couche de roulement d'une chaussée.

Une mauvaise résistance aux chocs et/ou à l'usure par attrition des granulats se traduit par la production de petits fragments de roches, susceptibles d'entraîner des déformations de l'ouvrage allant jusqu'à sa ruine. Une mauvaise résistance au polissage va, quant à elle, se traduire par des distances de freinage significativement accrues sur chaussée humide.

Les caractéristiques chimiques des granulats sont principalement liées à la présence de substances chimiques susceptibles d'engendrer des gonflements du béton (silice libérée par certains granulats naturels réagissant avec les alcalins du ciment, sulfates solubles contenu dans les granulats recyclés réagissant avec les produits d'hydratation du ciment, chaux libre qui s'hydrate dans les laitiers de convertisseur Linz-Donawitz) ou d'affecter sa prise (chlorures dans les granulats marins, matière humique dans les granulats alluvionnaires).

Enfin, les caractéristiques thermiques et d'altérabilité se limitent essentiellement à la résistance au gel-dégel, pour ce qui concerne les essais pratiqués en France. Une mauvaise résistance au gel se traduit par une fissuration des particules, qui engendre, elle aussi, la production de petits fragments de roches susceptibles d'entraîner des déformations de l'ouvrage allant jusqu'à sa ruine.

### 3.2.1 Résistance à l'usure micro-Deval (NF EN 1097-1)

L'essai consiste à appliquer un cycle d'usure par attrition en présence d'eau à deux éprouvettes constituées chacune de 500 g de gravillons de fraction 10/14 mm. Chaque éprouvette doit au préalable être tamisée à l'aide des tamis de 10 – 12,5 et 14 mm, de façon à éliminer les particules passant à travers le tamis de 10 mm et celles retenues sur le tamis de 14 mm, puis recomposée par pesage de façon à assurer entre 60 et 70 % de passant en masse au tamis de 12,5 mm. Ensuite, l'une des éprouvettes est introduite avec 2,5 l d'eau et une charge abrasive de 5 000 g de billes d'acier de diamètre 10 mm à l'intérieur d'un cylindre en acier d'axe horizontal (figure 13), de diamètre intérieur 20 cm. Puis, un cycle de 12 000 rotations du cylindre autour de son axe est réalisé, au rythme de 100 tr/min. À l'issue du cycle, l'éprouvette est soigneusement récupérée, tamisée à l'aide d'un tamis de 1,6 mm et le refus  $R$  (g) ainsi obtenu est séché puis pesé. Le **coefficient micro-Deval MDE** de l'éprouvette est alors donné par la formule suivante :

$$MDE (\%) = (500 - R)/5$$

Le cycle d'usure est réitéré avec la seconde éprouvette et son coefficient micro-Deval est calculé comme précédemment. Le coefficient micro-Deval du granulat 10/14 mm testé est la moyenne des coefficients micro-Deval des deux éprouvettes. Un granulat résiste d'autant mieux à l'usure par attrition en présence d'eau que ce coefficient moyen  $MDE$  est faible. L'essai peut également être réalisé sur les fractions granulaires 4/6,3 – 6,3/10 – 8/11,2 et 11,2/16 mm en utilisant une masse adaptée de la charge abrasive ; en France, il est très souvent pratiqué sur la fraction 6,3/10 mm, car celle-ci est couramment employée.

### 3.2.2 Résistance à la fragmentation Los Angeles (NF EN 1097-2)

Elle caractérise la résistance aux chocs des granulats. L'essai consiste à appliquer un cycle de broyage à sec à un échantillon de 5 000 g de gravillons de fraction 10/14 mm. L'échantillon doit au préalable être préparé par tamisage et pesage de façon analogue à l'essai d'usure. Puis, une charge abrasive de 11 boulets d'acier est introduite avec l'échantillon dans un cylindre en acier d'axe horizontal, de diamètre intérieur 71 cm et comportant une plaque fixée sur une génératrice. Ensuite, un cycle de 500 rotations du cylindre autour de son axe est réalisé, au rythme de 32 tr/min. Pendant chaque rotation, les boulets sont remontés par la plaque dans le haut du cylindre (figure 14) puis tombent en chute libre sur les particules restées dans le fond. À l'issue du cycle, l'échantillon est soigneusement récupéré, tamisé à l'aide d'un tamis de 1,6 mm et le refus  $R$  (g) ainsi obtenu est pesé. Le **coefficient Los Angeles LA** est alors donné par la formule suivante :

$$LA (\%) = (5\,000 - R)/50$$

Un granulat résiste d'autant mieux à la fragmentation par chocs que ce coefficient  $LA$  est faible. L'essai peut également être réalisé sur les fractions granulaires 4/8 – 6,3/10 – 8/11,2 et 11,2/16 mm en utilisant un nombre de boulets et une tolérance sur la masse de la charge abrasive adaptés ; en France, il est lui aussi très souvent pratiqué sur la fraction 6,3/10 mm.

### 3.2.3 Résistance au polissage (NF EN 1097-8)

Elle est caractérisée par le coefficient de polissage accéléré (PSV) des gravillons. L'essai consiste à soumettre successivement deux séries de 14 éprouvettes de gravillons à deux cycles de polissage simulant l'effet du trafic, puis à mesurer la rugosité résiduelle des gravillons à l'aide d'un pendule de frottement. L'essai est réalisé sur la fraction des gravillons passant au tamis de 10 mm et retenue sur une grille à fentes de 7,2 mm. Dans chaque série, 12 des 14 éprouvettes sont constituées de 6 granulats différents à tester (soit 2 éprouvettes par granulat), tandis que les deux dernières correspon-

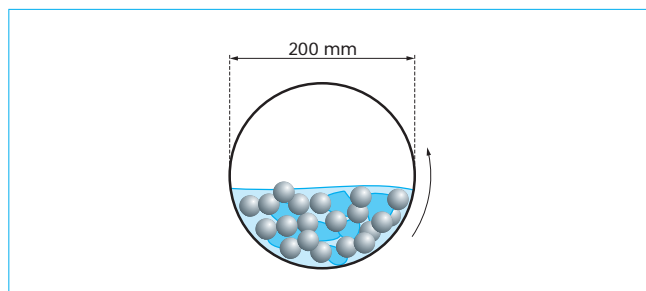


Figure 13 – Principe de l'essai micro-Deval en présence d'eau

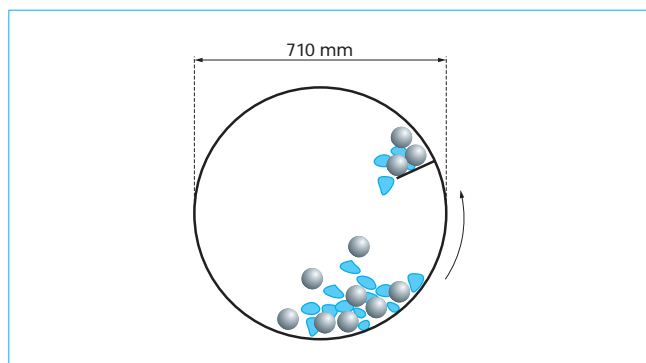


Figure 14 – Principe de l'essai Los Angeles

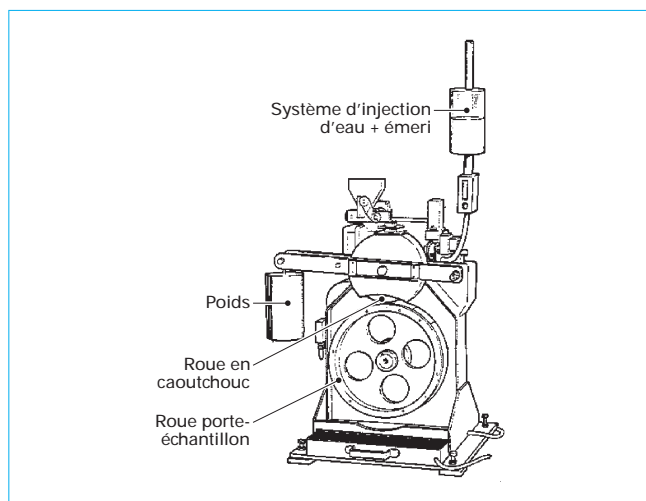


Figure 15 – Schéma de l'appareil PSV (extrait de la norme NF EN 1097-8)

dent au granulat de référence. Chaque éprouvette est confectionnée en disposant les gravillons face plane vers le bas dans un moule, de façon à constituer une mosaïque la plus complète et jointive possible, puis en remplissant les vides entre grains avec un sable roulé et en achevant le remplissage du moule à l'aide d'une résine de fixation des gravillons entre eux. La procédure d'essai consiste à disposer selon un ordre imposé les 14 éprouvettes de la première série à la périphérie d'une roue d'axe horizontal (figure 15), puis à réaliser deux cycles de trois heures de polissage au moyen d'un mélange d'eau et d'émeri (grossier puis fin) injecté en continu entre la roue

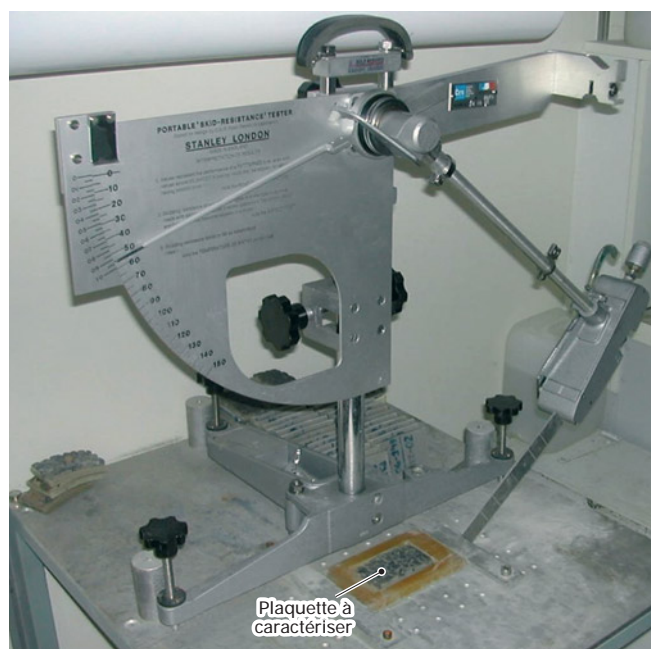


Figure 16 – Pendule de frottement de l'essai PSV

porte-échantillons et une roue en caoutchouc simulant le trafic. La procédure d'essai est ensuite répétée avec les 14 échantillons de la seconde série. À l'issue de ces cycles, la rugosité résiduelle des échantillons de gravillons est mesurée à l'aide d'un pendule de frottement (figure 16), dont le mouvement de balancier est freiné par le contact tangentiel du patin en caoutchouc avec la surface de l'échantillon. Si  $C$  et  $S$  désignent respectivement les rugosités moyennes mesurées sur les 4 échantillons du granulat de référence et sur les 4 échantillons d'un des granulats testés, le **coefficient de polissage PSV** accéléré de ce dernier est donné par la relation suivante :

$$PSV \text{ (sans unité)} = S + (52,5 - C)$$

Un granulat résiste d'autant mieux au polissage accéléré que cette valeur  $PSV$  est élevée. L'essai qui vient d'être décrit comporte deux inconvénients majeurs. D'une part, le coût prohibitif de l'émeri impose aux laboratoires d'attendre de disposer de 6 granulats différents (généralement 6 carrières différentes) à tester pour lancer un essai, ce qui peut être long. D'autre part, la confection des échantillons est longue, puisqu'elle nécessite de placer les particules une par une, et demande beaucoup de soin sous peine de biaiser les résultats. Il résulte de ces inconvénients des délais d'obtention des résultats relativement longs, ce qui peut poser problème pour certains chantiers.

Pour réduire ces délais, le Laboratoire régional des Ponts et Chaussées d'Angers a mis au point une procédure de polissage alternative appelée **essai RPA** (norme expérimentale XP P 18-580). La procédure consiste à balayer de façon incrémentale la surface des échantillons à l'aide d'un jet d'eau et de farine de silice à 10 MPa sous une incidence de  $40^\circ$  (figure 17), puis à mesurer la rugosité résiduelle à l'aide du pendule de frottement. Le nombre d'échantillons testés est ramené à 4, dont 2 échantillons constitués du granulat de référence et les 2 autres du granulat à tester. Pour conserver une représentativité satisfaisante, la surface des échantillons est triplée par rapport à l'essai  $PSV$ . La mise en place des gravillons est simplifiée, puisqu'elle est effectuée par un dispositif vibrant. 20 cycles de balayage sont ainsi effectués en 50 min au maximum, puis les échantillons sont lavés et passés au pendule de frottement. Le coefficient de polissage  $RPA$  du granulat testé correspond au polissage moyen des deux échantillons, corrigé du polissage

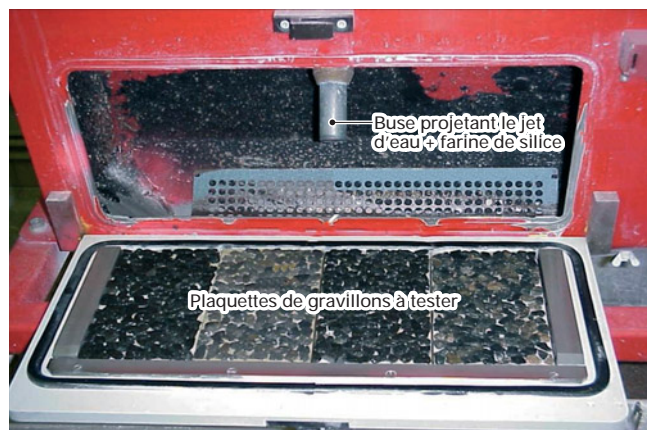


Figure 17 – Appareil de polissage RPA mlpc®

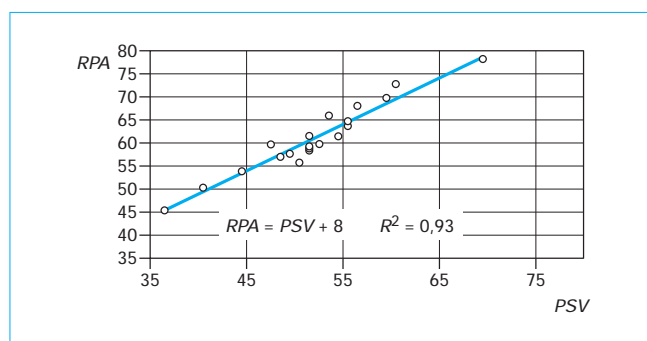


Figure 18 – Corrélation entre les résultats des essais PSV et RPA

moyen mesuré sur les échantillons de référence. La figure 18 montre une bonne corrélation entre les résultats des essais  $PSV$  et  $RPA$  (coefficient de corrélation  $R$  proche de 1).

### 3.2.4 Réactivité aux alcalins (XP P 18-594)

L'**alcali-réaction** est une réaction chimique entre certaines phases siliceuses présentes dans les granulats et les alcalins de la phase liquide du béton (ces alcalins, basiques, proviennent du ciment utilisé mais également des granulats eux-mêmes, raison pour laquelle un bilan des alcalins des granulats selon la méthode française LPC n° 37 est préconisé). Cette réaction engendre la formation d'un produit de réaction amorphe silico-calco-alcalin, dont l'expansion peut provoquer des gonflements préjudiciables à la durabilité des ouvrages en béton (barres, ponts, etc.).

Aucun essai européen n'existe à ce jour pour qualifier les granulats vis-à-vis de l'alcali-réaction ; cependant, les résultats de travaux européens récents devraient prochainement alimenter la rédaction d'un projet de norme européenne. En attendant, la France dispose d'un fascicule de documentation (FD P 18-542), qui décrit les critères et la démarche de qualification des granulats vis-à-vis de l'alcali-réaction.

■ En préalable à toute réalisation d'essai, une **étude pétrographique** doit être menée afin d'identifier les espèces minéralogiques réputées réactives et les quantifier [5]. En effet, seule cette étude



permet d'orienter vers le choix de l'essai dont le domaine de validité correspond au diagnostic pétrographique préalablement établi.

Le diagnostic pétrographique intervenant dans le cadre du fascicule FD P 18-542, a pour but de déceler les espèces pétrographiques susceptibles d'entraîner des désordres lors de leur incorporation dans le béton. Comme tout diagnostic pétrographique, l'étude orientée vers l'alcali-réaction est grandement basée sur l'expérience de l'observateur, qui va pouvoir déceler les défauts, les modifications et les indices susceptibles d'orienter son diagnostic vers la non réactivité ou la réactivité potentielle du ou des granulats en question.

Plusieurs facteurs peuvent rendre les minéraux réactifs ou non. La plus ou moins grande altérabilité de certains minéraux, comme les feldspaths, a une influence sur leur réactivité en milieu alcalin, par la remobilisation des ions potassium, sodium, calcium. Le quartz, autre minéral abondant dans les granulats, peut présenter certaines morphologies susceptibles de le rendre plus vulnérable aux attaques en milieu alcalin. Enfin, la silice peut être présente sous différents systèmes cristallographiques voire même sous forme amorphe. Le principal outil utilisé pour mener à bien ces déterminations minéralogiques est le microscope optique polarisant.

Suite à cette étude pétrographique, les granulats sont qualifiés de non réactifs (NR, aucun risque de désordre par gonflement), potentiellement réactifs ou potentiellement réactifs à effet de pessimisme (respectivement PR et PRP, aucun risque de désordre seulement si des mesures préventives sont appliquées). L'effet de pessimisme représente la capacité d'un granulats à produire un gonflement lorsqu'il est incorporé dans une formule de béton pour une quantité précise (dite pessimale, généralement comprise entre 4 et 10 %) ; en deçà et au-delà de cette quantité, aucun gonflement n'est enregistré.

■ Le fascicule de documentation FD P 18-542 s'appuie sur les méthodes d'essai de réactivité décrites dans la norme expérimentale XP P 18-594. La méthode française de référence (essai sur mortier par autoclavage) est succinctement décrite ci-après.

L'essai sur mortier par autoclavage est réalisé sur des granulats dont l'identification a révélé une teneur en silice ( $\text{SiO}_2$ ) supérieure à 4 % et dont l'étude pétrographique a mis en évidence une teneur en espèces minérales réactives supérieure à 4 % (sinon le granulats est NR). Il consiste à mesurer l'expansion moyenne d'éprouvettes de mortier réalisées à l'aide des granulats à tester, le granulats étant non réactif si cette expansion demeure inférieure à 0,15 %. Pour cela, les granulats à tester sont broyés de sorte qu'ils passent à travers un tamis de 5 mm, puis trois mélanges pour mortier sont recomposés en cinq tranches granulométriques par tamisage et pesage. Des quantités de ciment et d'eau en proportion variable d'un mélange à l'autre sont ensuite ajoutées (rapport entre les quantités de ciment et de granulats  $C/G = 0,50$  ou  $1,25$  ou  $2,50$ , ces deux derniers rapports étant réservés aux sables réputés PRP), puis chaque mortier est malaxé avec un ajout d'alcalin ( $\text{NaOH}$ ) selon une procédure imposée. Chaque mortier est alors versé dans trois moules équipés de plots de mesure en acier, de façon à réa-

liser des éprouvettes prismatiques à base carrée normalisées. Après conservation de ces éprouvettes pendant 24 h dans une armoire à humidité et température maîtrisées, les éprouvettes sont démoulées et immergées 24 h dans l'eau. Les longueurs des trois éprouvettes de chaque mortier sont ensuite mesurées, puis les éprouvettes sont introduites dans un autoclave à température et pression imposées pendant 5 h. Après 18 h de refroidissement, les longueurs des trois éprouvettes de chaque mortier sont de nouveau mesurées, rapportées à leurs longueurs initiales respectives, puis l'expansion moyenne est calculée.

### 3.2.5 Teneur en sulfates solubles dans l'eau (XP P 18-581)

La méthode d'essai consiste à solubiliser par lessivage à l'eau chaude les sulfates potentiellement actifs (notamment gypse et plâtre) des granulats recyclés issus principalement de la déconstruction de bâtiments, puis à précipiter ces sulfates à l'aide de chlorure de baryum, enfin à doser le précipité par spectrophotométrie. L'essai est réalisé sur 25 g de granulats de fraction 0/4 mm (obtenus si nécessaire par concassage), à pH neutre. Le lessivage est effectué avec 1 l d'eau distillée. Le spectrophotomètre émet une lumière de longueur d'onde  $500 \cdot 10^{-9}$  m, dont l'absorption de l'intensité lumineuse par le précipité est proportionnelle à la quantité de sulfates précipités.

Cette méthode d'essai française est en cours d'incorporation dans la norme européenne définissant les méthodes d'analyse chimique (NF EN 1744-1).

### 3.2.6 Résistance au gel-dégel (NF EN 1367-1)

L'essai consiste à faire subir 10 cycles de gel-dégel sous l'eau à trois éprouvettes de gravillons de fraction 8/16 mm préalablement imbibés d'eau, puis à déterminer leur perte de masse moyenne. Les éprouvettes sont préparées par tamisage à l'aide des tamis de 8 et 16 mm et pesage. Elles sont ensuite immergées chacune dans une boîte contenant de l'eau distillée à 20 °C pendant 24 h. Puis chaque boîte est disposée dans une armoire réfrigérante pour subir 10 cycles de gel-dégel, à variation de température imposée. À l'issue de ces cycles, le refus à 4 mm de chaque éprouvette est séché puis pesé. Si  $M_1$  désigne la masse initiale d'un échantillon et  $R_1$  son refus au tamis de 4 mm après essai, sa perte de masse  $F_1$  est donnée par la relation :

$$F_1 \text{ (sans unité)} = (M_1 - R_1)/M_1$$

La perte de masse moyenne est la moyenne des pertes de masse des trois éprouvettes. Un granulats résiste d'autant mieux au gel-dégel que la valeur moyenne  $F$  est faible. S'il est recommandé de réaliser l'essai sur 2 000 g de gravillons de fraction 8/16 mm, l'essai peut néanmoins être réalisé sur les fractions 4/8 – 16/31,5 ou 31,5/63 mm, en ajustant la masse d'échantillon et en éliminant après les cycles de gel-dégel le passant à  $d/2$ .

## Références bibliographiques

- [1] DESCANTES (Y.), BLOT (G.) et DUCASSOU (J.B.). – *Vidéogranulomètre VDG 40 : Synthèse des recherches passées et perspectives*. Collection Études et Recherches des Laboratoires des Ponts et Chaussées, LCPC, Paris (2003).
- [2] BOUQUETY (M.N.). – *Étude de la morphologie des granulats et caractérisation par ombroscopie*. Thèse de l'École Centrale et de l'Université de Nantes (2003).
- [3] DESCANTES (Y.), FOSSE (Y.) et EHRET (G.). – *Automated measurement of aggregate properties : Part 1 – Crushed and broken surfaces in coarse aggregate particles*. Materials and Structures (RILEM), vol. 39, n° 1, p. 3-11 (2006).
- [4] DESCANTES (Y.), FOSSE (Y.) et MILCENT (F.). – *Automated measurement of railway ballast angularity*. Journal of Materials in Civil Engineering (ASCE), vol. 18, issue 4, p. 612-618 (2006).
- [5] LE ROUX (A.), THIÉBAUT (J.), GUÉDON (J.-S.) et WACKENHEIM (C.). – *Pétrographie appliquée à l'alcali-réaction*. Collection Études et Recherches des Laboratoires des Ponts et Chaussées, LCPC, Paris (1999).