

Chapitre 1 : Introduction et généralités

1.1/ Définition : Les matériaux de construction sont des matériaux utilisés dans les secteurs de la construction : bâtiments, ouvrages d'art et travaux publics (souvent désignés par le sigle BTP). Ils ont la propriété de résister contre des forces externes mécaniques et/ou thermiques importantes. Ce sont principalement les granulats, l'industrie de béton, la pierre taillée, les terres cuites et ses dérivées (les briques, les tuiles, les carrelages, les éléments sanitaires), le kaolin, le talc, Feldspaths, le bois, le verre, l'acier, l'aluminium, les matières plastiques (isolants notamment)....

Les propriétés principales des matériaux peuvent être divisées en plusieurs groupes tels que:

- Propriétés physiques : la dimension; la propreté; la densité et masse volumique; la porosité et absorption; teneur en eau, perméabilité, retrait et gonflement...
- Propriétés mécaniques : la résistance en compression, en traction, à la fragmentation, à l'usure...
- Propriétés chimiques : l'alcalinité (concentration en ions OH⁻), l'acidité, solubilité, oxydation et corrosion...
- Propriétés thermiques et altérabilité : gel-dégel, la dilatation et retrait au séchage, carbonatation, la résistance et comportement au feu, choc thermique...

Dans ce cours, on va s'intéresser aux caractéristiques physico-mécaniques des granulats et matériaux utilisés en BTP et leurs spécifications et exigences d'utilisation.

1.2/ Granulat (Aggregate) : Ensemble de grains minéraux de dimensions comprises entre 0 mm et 125 mm (XP P18-540 Octobre 1997), tout matériau granulaire utilisé dans la construction (XP P18-545 Mars 2008 et NA 5043 de 2007).

Les granulats sont dits :

- Naturels : lorsqu'ils sont issus de roches meubles ou massives (granulat d'origine minérale) et n'ayant subi aucune transformation autre que mécanique (concassage, criblage...).

- artificiels : lorsqu'ils résultent d'un procédé industriel comprenant des transformations thermiques ou autres, de roches ou de minerais (origine minérale), exemple : laitiers de hauts fourneaux, pouzzolanes, mâchefers, argile expansée, schiste expansé, verre expansé, cendres volantes, scories d'aciérie, bauxite calcinée, fumée de silice ...).

- recyclés : lorsqu'ils sont obtenus par traitement d'une matière inorganique précédemment utilisée dans la construction (granulats recyclés à partir de démolition de bâtiment, d'ouvrages ou de chaussée...).

- courants : lorsque leur masse volumique réelle $MVR \geq 2 \text{ t/m}^3$ (2000 kg/m^3)

- légers : lorsque leur masse volumique réelle $MVR < 2 \text{ t/m}^3$

Laitiers de hauts fourneaux : C'est un coproduit issu de la fabrication de la fonte dans un haut fourneau, où il correspond à la gangue stérile du minerai de fer à laquelle s'ajoutent les cendres du coke. Les laitiers sont appréciés comme remblai ou comme matière première dans la fabrication des ciments.

La pouzzolane : c'est une scorie (projections) volcaniques basaltique à texture alvéolaire, en raison de sa très forte porosité, elle est à la base de la fabrication de certains ciments à prise lente, utilisés notamment dans la constitution du béton des barrages de type BCR (Béton Compacté au Rouleau). Elle est considérée comme granulats légers entrant dans la confection des bétons de construction. Dans les travaux publics, sa faible densité ($0,85 \text{ t/m}^3$) lui permet de mettre en œuvre des remblais allégés, elle est utilisée aussi en remblaiement sur ouvrage souterrain.

Mâchefers : sont des déchets industriels et urbains des usines d'incinération. Le mâchefer est souvent utilisé en travaux publics comme remblai de tranchée ou sous-couche de chaussée en substitution de matériaux plus nobles, tels que le sable. Utilisé aussi comme liant hydraulique (effet de prise comparable à celui du ciment).

Argile expansée : L'argile expansée, également connue sous les termes d'argile cuite de galets, hydrocorns, latérite, ou plus simplement « billes d'argile », est un matériau granulaire léger constitué de petits globes de brûlé et bouffi d'argile. Le schiste expansé est une variante d'argile expansée obtenue par cuisson de schistes appropriés, utilisée dans la construction. Les argiles expansées ont une structure alvéolaire et sont obtenus par expansion à chaud d'un minéral argileux. Ils sont disponibles en différents formats tels que 0/3, 2/4, 4/8, 8/16 ou 10/20 (de 10 à 20 mm de diamètre). La densité standard de vrac sec de granulats légers d'argile expansée est de 250 à 480 kg/m^3 .

L'argile expansée est utilisée dans : la construction (bétons et mortiers : réfractaire, allégeant, isolant thermique), les infrastructures et le traitement de l'eau.

Verre expansé : Le verre expansé ou verre cellulaire est produit à partir des matériaux usuels utilisés pour le verre (sables fondus) auxquels on ajoute 0,15 % de poudre de carbone utilisée comme agent gonflant. Le sable est fondu à 1 000 °C avant d'y ajouter le carbone.

Le verre cellulaire est utilisé principalement comme isolant thermique ininflammable dans les constructions et bâtiments et possède la plupart des propriétés usuelles des verres : résistance à l'eau et au feu, d'où son attractivité pour l'édification d'un bâtiment, stabilité et résistance à la compression. Cependant comme tout verre, il reste un matériau fragile qui accroît les contraintes de manipulation lors de la construction. On retrouve des panneaux composés de ce matériau soit sous forme d'une mousse expansée inorganique de verre cellulaire, soit sous forme de granulats inclus dans des panneaux de polyuréthane.

Cendres volantes : déchets issus de la combustion du charbon dans les grandes chaudières industrielles et dans les chaudières de centrales électriques au charbon. À échelle microscopique, ces cendres se présentent comme un agglomérat de particules fines, expulsées de la chambre de combustion avec les gaz de combustion. Elles sont dites volantes par opposition aux mâchefers. Les cendres volantes se solidifient rapidement à partir de gaz et particules en suspension dans les gaz de combustion et d'échappement (ce qui leur confère une forme sphérique, et ont une taille de 0,5 μm à 300 μm).

Elles sont utilisées en béton (la cendre s'y substitue au sable ou au clinker de ciment) ; en remblai et matériau de comblement ou lissage (en construction routière principalement et pour combler des tranchées) ; stabilisation /solidification de déchets ; matériau de comblement de mines et autres cavités ; stabilisation de sols mous (argileux) ; production de brique (la cendre y joue un rôle d'agrégat de substitution ; charge minérale d'enrobé bitumineux ou de béton bitumineux).

Scories d'aciérie : les scories sont des sous-produits solides issus de la fusion, de l'affinage, du traitement ou de la mise en forme des métaux à haute température. Ce sont des mélanges d'oxydes divers qui surnagent sur le métal en fusion, ou s'en détachent lors de leur mise en œuvre à haute température. Elles sont parfois recyclées dans le processus de fabrication de l'usine métallurgique, ou réutilisées dans le domaine de la construction (dans des ciments ou bétons) ou encore comme matériaux routiers, couche de fondation, voire de roulement (dans des bétons bitumineux ou enduits superficiels).

Fumée de silice : est un déchet industriel généralement valorisé comme sous-produit de la métallurgie du silicium et/ou de la production d'alliages à base de silicium (ferrosilicium). Les particules sont sphériques et d'un diamètre moyen de particules de 150 nm.

Ses propriétés de matériau pouzzolanique font qu'elle est utilisée en grande quantité dans la synthèse de divers ciments (dosage habituel est de 5 à 15 % du poids du ciment) et bétons ou comme additif pour stabiliser les particules récupérées lors de la filtration de fumées d'incinérateurs ou pour inerte ou stabiliser des sols pollués, des sédiments pollués (sédiments marins ou estuariens), éventuellement dans une matrice bitumineuse

Bauxite calcinée : La bauxite est une roche latéritique blanche, rouge ou grise, caractérisée par sa forte teneur en alumine Al_2O_3 et en oxydes de fer. Cette roche constitue le principal minerai permettant la production d'aluminium, Quand elle est calcinée (chauffée, brûlée), elle se désagrège en donnant des granulats.

Indépendamment de leur origine minéralogique, on classe les granulats naturels en deux catégories :

- Les granulats issus de roches meubles, ils correspondent à des matériaux détritiques non consolidés généralement déposés pendant l'ère quaternaire par les glaciers, les cours d'eau ou les fonds marins peu profonds. Les matériaux les plus convoités et les plus exploités sont les granulats alluvionnaires et les sable de dunes, dits roulés, dont la forme a été acquise par l'érosion. Ces matériaux qui renferment de sables et graviers siliceux et silico-calcaires, se situent dans les lits (ou anciens lits) des rivières, dans leurs basses vallées ou dans les terrasses. Les matériaux alluvionnaires sont meubles et leur extraction peut être réalisée à un prix modéré. Outre les qualités mécaniques des éléments qu'ils renferment, ces dépôts ont souvent l'avantage d'être propres (exempts de fines argileuses).

- Les granulats concassés sont obtenus par abattage et concassage de roches massives exploitées en carrières, ce qui leur donne des formes angulaires. Différentes phases de concassage et criblage aboutissent à l'obtention de granulats propres et des classes granulaires souhaitées. Les gisements de roches massives correspondent à une multitude de situation géologiques (couches plus ou moins épaisses, filons, épanchements volcaniques, massifs de granite...). L'exploitation s'effectue à flanc de coteau (surélévation) ou en puits, en fonction de la position du niveau géologique utile. Les granulats concassés présentent des caractéristiques qui dépendent d'un grand nombre de paramètres : origine de la roche, régularité du banc, degré de concassage ...

1.3/ Sol : Les sols sont des matériaux naturels, constitués de grains minéraux pouvant se séparer aisément par simple trituration ou éventuellement sous l'action d'un courant d'eau. C'est le résultat d'une altération naturelle physique ou chimique des roches. Les grains peuvent être de dimensions très variables, allant des argiles aux blocs. Les sols sont de nature géologique diverse : alluvions, colluvions, matériaux meubles sédimentaires, dépôts glaciaires, sols résiduels, Leur pourcentage de matières organiques est inférieur ou égal à 3 %. (NF P 11-300 : GTR).

Les sols résiduels sont des sols formés sur place par un processus d'altération physico-chimique des roches, par exemple : arènes granitiques, latérites; les latérites et bauxites des régions tropicales comportent notamment des matériaux argileux et graveleux.

Les lœss : dépôt d'origine éolienne.

1.4/ Domaines d'utilisation : Les granulats sont destinés à la confection des bétons et mortiers, des couches composant les chaussées (couche de fondation, de base et de

roulement) et les assises de voies ferrées (ballasts), utilisés aussi en enrochement et comme matériau drainant (figure 1.1-1.7).

Les sols sont utilisés dans la construction des remblais et couches de formes d'infrastructure routière, dans les barrages comme remblai ou comme digue et dans les ouvrages de soutènement (terre armée).

Chacune de ces utilisations impose des spécifications portant sur des propriétés très diverses d'ordre géométrique, physico-mécanique et chimique. Ces propriétés jouent un rôle important lors de la mise en œuvre de ces matériaux.

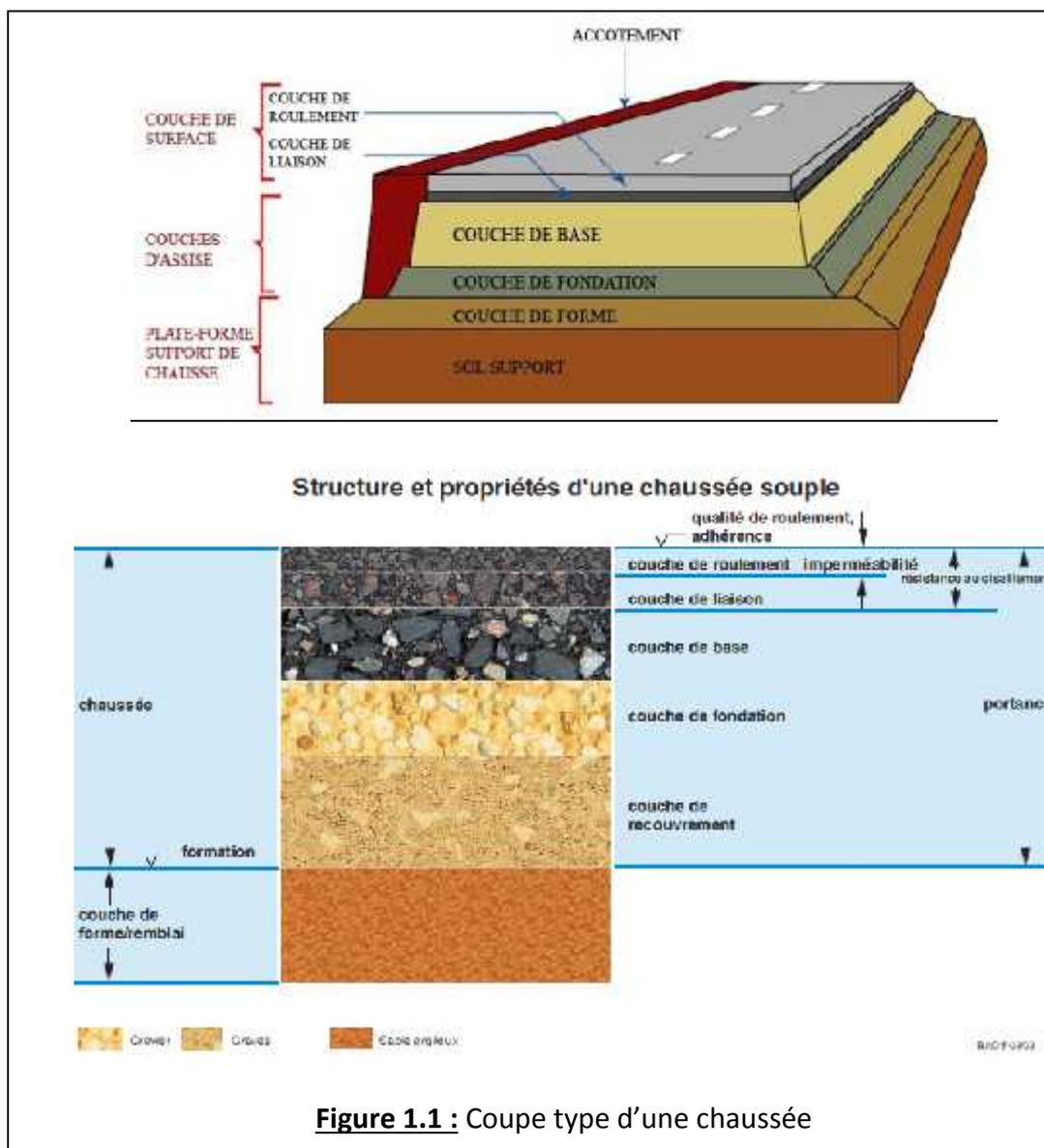


Figure 1.1 : Coupe type d'une chaussée

Les informations suivantes donnent à titre d'exemple le dimensionnement de la chaussée de l'autoroute algérienne Est-ouest :

CDForme (30 cm) constituée de Grave Non Traitée GNT : Tout venant de carrière (TVC) sélectionné et ôté d'argile (0/63 mm qui répond à un fuseau de granularité bien défini).

CD Fondation (22 cm) constituée de Grave Ciment GC : Grave (0/31.5) traitée à 3 ou à 4 % de ciment (grave reconstituée car difficile à obtenir directement : 0/4 + 4/10 + 10/31.5).

CDBase (16 cm) constituée de Grave Bitume GB : Grave (0/20) traitée à 4 % de bitume (grave reconstituée 0/4 + 4/10 + 10/20 car difficile à obtenir directement).

CD Roulement (6 cm) constituée de Béton Bitumineux BB : Grave (0/14) traitée à 5 % de bitume (grave reconstituée 0/4 + 4/16 car difficile à obtenir directement).

Couche de liaison : est conçue si les sollicitations sont importantes (fort trafic) ou si la couche de roulement est mince ou très mince (5 à 6 cm), on utilise un BB liaison qui est un enrobé de granulométrie serrée 0/8, Cet enrobé est appelé aussi micro BB

Granulats pour mélanges hydrocarbonés (Enrobés bitumineux : GB et BB) et enduits superficiels (3/8 + 8/15 + bitume fluidifié 400/600).

Granulats pour matériaux traités aux liants hydrauliques (GNT de GC) et matériaux non traités (GNT 0/20 ou 0/31.5 ou 0/63mm des CD Fondation, CDBase et les accotements).



Figure 1.2 : Photos montrant les différentes classes granulaires pour la confection des bétons



Figure 1.3 : Matériaux utilisés pour remblaiement et couche de forme des routes



Figure 1.4 : Matériaux utilisés pour couche de fondation et couche de roulement



Figure 1.5 : Photos montrant l'utilisation des ballasts comme assises des voies ferrées



Figure 1.6 : Photos illustrant l'utilisation des granulats comme matériaux drainants



Figure 1.7 : Renforcement et stabilisation des talus de route et berge d'oued par enrochement



Figure 1.8 : sols utilisés dans les barrages en terre comme remblai et comme digue

1.5/ Caractéristiques intrinsèques et de fabrication : Les granulats sont issus soit de roches massives exploitées en carrières, soit de roches meubles provenant des sablières et gravières, ils empruntent à ces roches une grande partie de leurs propriétés et en particulier toutes leurs caractéristiques intrinsèques. De plus le mode de gisement de ces matériaux conditionne la façon de les extraire et de les traiter, c'est-à-dire la rentabilité de l'exploitation. La façon d'extraction et de traitement des granulats va influencer une partie leur caractéristiques notamment celles géométriques et la propreté.

1.5.1/ Caractéristiques intrinsèques : Propriétés des granulats qui dépendent aux caractères propres des roches originelles, elles sont essentiellement liées à la nature (composition minéralogique) et à la qualité (texture et microstructure) de la roche exploitée. Ce sont les propriétés physiques et mécaniques : masse volumique et densité, absorption d'eau et porosité, Los Angeles, micro-Deval, résistance au polissage, friabilité des sables...

1.5.2/ Caractéristiques de fabrication : Propriétés des granulats dépendant essentiellement des conditions de gisement, d'exploitation et d'élaboration (caractéristiques géométriques et propreté) : granularité, aplatissement, angularité, indice et rapport de concassage (IC), qualité des fines (propreté des sables et graves : ES et VB), teneur en fines des gravillons (propreté superficielle des gravillons), teneur en chlorure des granulats marins, ...Ces dernières peuvent être considérablement améliorées en mettant en œuvre des méthodes d'extraction, de fragmentation et de classement appropriées alors que les caractéristiques mécaniques ne peuvent être que peu influencées par l'élaboration.

Chapitre 2 : Identification des granulats

Inspiré de la norme P18-557 (Septembre 1990) : éléments pour l'identification des granulats, et EN 932-3 (Décembre 1996 puis Avril 2004) : Procédure et terminologie pour la description pétrographique simplifiée.

L'identification des roches pour granulat comprend nécessairement plusieurs aspects relatifs à la description pétrographiques et aux essais d'identification.

2.1/ Identification des granulats issus de roches massives : les granulats issus de roches massives sont généralement constitués par des mélanges de plusieurs espèces minérales qu'il convient de déterminer sur le plan pétrographique. L'assemblage des grains minéraux dans la roche n'est jamais parfait, il subsiste entre eux des vides grossièrement équidimensionnels appelés « pores », il y a aussi des défauts inter ou intracrystallins appelés « fissures ». Ces discontinuités sont en grande partie responsables du comportement mécanique des roches.

Il est possible par simple observation à l'œil nu ou à la loupe binoculaire de distinguer les différents faciès et d'en déterminer les proportions relatives des minéraux composant le granulat. L'identification plus précise de ces minéraux ainsi que leur taille et leur état d'altération doit se faire à partir de lames minces à l'aide d'un microscope polarisant. Dans certains cas, pour déterminer la présence de calcite, on utilise l'acide chlorhydrique HCL dilué. Dans d'autres, le recours à l'analyse chimique et aux rayons X est très utile (structure cryptocristalline par exemple).

L'identification d'une roche est basée principalement sur :

-la composition minéralogique et l'éventuelle présence d'espèces minérales nuisibles, l'état d'altération, la structure (et texture), la masse volumique réelle et la porosité, l'indice de continuité (et si c'est possible l'anisotropie), l'analyse chimique et la réactivité aux alcalis (ou qualification vis-à-vis de l'alcali-réaction).

2.1.1/ composition minéralogique : une roche est composée de minéraux assemblés entre eux qu'il convient de déterminer par une étude pétrographique. Ces minéraux sont de petite taille et nécessitent l'examen de la roche, taillée en lames minces, au microscope polarisant. Si la roche est anisotrope, la lame mince doit être taillée perpendiculairement au litage ou à la schistosité. La description pétrographique consiste à déterminer la nature des différents minéraux et leur proportion relative, leur texture (grosseur et arrangement), leur degré d'altération ainsi que l'existence éventuelle de pore. Cet aspect est important si l'on veut déceler la présence et la proportion de minéraux nuisibles vis-à-vis des liants et présentant certains dangers :

- Silice amorphe ou cryptocristalline (opale, calcédoine, cristobalite, tridymite, quartz cryptocristallin), quartz déformé ou à surface corrodée, sulfures (de fer) et sulfates (pyrite, gypse, anhydrite), composés magnésiens (dolomite, serpentines altérées), minéraux altérés

et feldspaths...pour leur éventuelle réaction avec les liants hydrauliques (oxydables et réactifs).

- Silicates en feuillets (micas, chlorites, argiles) et hydroxydes de fer (goethite...) pour leur forme et leurs propriétés d'absorption d'eau particulières (hydrophiles).

La forme aplatie des micas est très défavorable pour l'adhésivité des liants sur les granulats. La biotite est parfois considérée comme un minéral réactif vis-à-vis de l'alcali-réaction.

- matière organique : pour leur réactivité avec les liants hydrauliques, sa présence ($\geq 0.5\%$) retarde la prise et le durcissement des bétons et réduit la résistance à la compression (EN 1744-1).

La dureté Vickers des différents minéraux permet d'avoir une idée sur l'abrasivité des granulats. Certains minéraux comme les feldspaths et la dolomite conduisent souvent à des abrasivités plus fortes lorsque les cristaux sont supérieurs à 0.1 mm, car leur rupture se fait suivant des clivages qui donnent des arêtes vives.

Minéral	Dureté Vickers kg/mm ²
Quartz	1280
Feldspath	690-750
Pyroxène	680-750
Amphibole	730-750
Dolomite	350-400
Calcite	110
Micas	85-90
Pyrite	1050
Olivine	820
Silicates du métamorphisme	800-1300
Verre volcanique	600

L'abrasivité est une indication sur la résistance de la roche à la fragmentation (broyabilité). L'essai consiste à calculer la perte de masse d'une palette d'acier après rotation selon des conditions bien précises, dans un échantillon de granulats jouant le rôle d'une charge abrasive. L'abrasivité dépend à la fois de la teneur en minéraux durs (quartz et dolomite notamment) et de la résistance de l'assemblage des grains (cohésion de la roche).

Clivage : Dans un minéral on peut avoir des plans de clivage et des fractures. Les fractures sont aléatoires et peuvent être sinueuses, le clivage est plusieurs **surfaces de discontinuité ordonnées, rectilignes, parallèles et de même orientation**. Un minéral peut y avoir 1, 2, 3 ou 4 clivages c.-à-d. plusieurs orientations, on dit clivage 1 : veut dire 1 seul plan de clivage qui indique une seule orientation des surfaces de discontinuité, les micas montrent toujours 1 seul plan de clivage, la calcite montre 3 plans de clivage c.-à-d. plusieurs surfaces de discontinuité présentant 3 orientations différentes. On dit aussi clivage 001 : en 3D le minéral est un volume avec plusieurs surfaces, le 001 est l'une de ces surfaces.

2.1.2/ Etat d'altération : l'altération des minéraux conduit au développement d'espèces hydrophiles et réactives, dont on peut mesurer la surface spécifique totale par l'essai au bleu de méthylène (la prise d'essai est constituée de 100 gr la roche broyée, passant au tamis 0.036 mm). Cette valeur de bleu peut être considérée comme une mesure de l'état d'altération de la roche, elle apporte des informations intéressantes sur les risques de pollution des gravillons et surtout des sables (présence d'éléments fins comme les argiles et les limons).

2.1.3/ Texture et structure : la texture est une indication de la dimension (taille et forme) des grains minéraux et de la disposition relative des cristaux de la roche (mode d'arrangement périodique des atomes formant les cristaux). Quant à la structure, elle donne une indication sur la discontinuité de la roche, c'est - à - dire la disposition des pores et fissures ainsi que les plans de faiblesse (plans de clivage, joints stylolithiques, joints de stratification).

Influence de la structure : type de structure (vacuolaire, fissurée), fissures recristallisées, minéraux secondaires, joints stylolithiques, plans de clivage, joints de stratification, texture litée...

Influence de la texture : diamètre des grains (roche à grains fins résiste plus par rapport à celle à grains grossiers), forme et état de surface (rugosité, grains usés, arrondis...), type textural : jointif, réticulé (minéraux de taille et de forme différentes qui forment un réseau c-à- d tissu de minéraux), empâté (minéraux jointifs amorphes ou minéraux non visibles qui forment une pâte interstitielle entre des cristaux visibles).

Une texture très fine (roches volcaniques par exemple) conduit toujours à une forte résistance mécanique, mais les cassures sont plus lisses et ces roches sont plus polissables.

On peut distinguer 6 textures de base (des roches magmatiques), suivant l'ordre de grandeur de la dimension des cristaux :

-macrogrenue ou grenue : à grains minéraux non orientés de taille supérieure ou égale à 1 mm et atteignant 10 mm (bien visibles à l'œil nu) : cas des roches magmatiques plutoniques dont le magma se refroidit lentement en profondeur (granite, granodiorite...).

-microgrenue : à grains minéraux non orientés de taille comprise entre 0.1 et 1 mm, (visibles difficilement à l'œil nu ou à la loupe binoculaire), exemple microgranite (roches magmatiques plutoniques dont le magma se refroidit peu lentement en profondeur)

-cryptocristalline : à cristaux très petits de taille comprise entre 0.01 et 0.1 mm, très peu visibles au microscope optique.

-vitreuse : lorsque les cristaux de taille inférieure à 0.001 mm (cristaux non visibles) n'ont pas eu le temps de se former, la cristallisation est incomplète, exemple obsidienne.

-microlitique : lorsque les minéraux sont formés de microlites (petits bâtonnets millimétriques visibles au microscope optique) noyés dans une pâte vitreuse (un verre). Les roches microlitiques sont d'origine volcanique et se forment par refroidissement rapide du magma, exemple basalte.

-porphyrique : lorsque des cristaux automorphes millimétriques ou centimétriques apparaissent nettement dans une matrice plus fine (cas des roches magmatiques)

Il est nécessaire d'ajouter quelques termes précisant certaines particularités de structures plus complexes :

-orientée : pour une structure anisotrope, due à l'orientation préférentielle des cristaux dans les roches métamorphiques

-schisteuse si cette orientation est très forte dans les roches métamorphiques

-litée (ou foliée): lorsque l'on a des alternances de lits minéralogiquement différents dans les roches métamorphiques

-fissurée (ou diaclasée) si un réseau de fissures parcourt la roche (tous types de roches)

-vacuolaire (ou alvéolaire) si la roche comporte des pores visibles à l'œil nu (tous types de roches)

La structure et la texture ont une certaine importance vis-à-vis de la résistance mécanique de la roche et de leur aptitude à donner des éléments plats lors du concassage (roche à grains fins résiste plus par rapport à celle à grains grossiers).

2.1.4/ masse volumique et porosité : il est important de connaître la masse volumique réelle et la porosité des roches car leur résistance mécanique est directement liée à leur porosité. Cette dernière renseigne notamment sur la sensibilité au gel des roches. Elle est aussi indispensable en formulation des bétons.

2.1.5/ indice de continuité (ou de qualité) et degré de fissuration : une roche comporte généralement des microfissures, des pores et des minéraux altérés. Certaines propriétés physiques ou élastiques (comme la vitesse de propagation des ondes sismiques longitudinales P) sont très sensibles à ces discontinuités. Il est possible, en comparant la vitesse théorique calculée V_{Lc} à partir de la composition minéralogique à la vitesse mesurée sur la roche (ou granulat) V_{Lm} , de déterminer un indice de continuité ou de qualité : **$Ic = 100 \cdot (V_{Lm}/V_{Lc})$** qui est d'autant plus voisin de 100 que la roche est plus saine (absence d'altérations, de pores et de fissures).

V_{Lc} est la vitesse moyenne pondérée des vitesses des minéraux constituant la roche. En utilisant la relation $1/V_{Lc} = \sum_i C_i / V_{Li}$ (avec C_i concentration du minéral et V_{Li} vitesses dans ce minéral) et en tenant compte de la porosité n de la roche, il est possible de calculer le degré de fissuration d'une roche (ou d'un granulat): **$D_f = 100 - 1.4 n - Ic$** .

Application : Une roche granitique composée de 30% de Qz, 40% de plagioclases et 30% d'augite, sa porosité est de 03%. La vitesse longitudinale mesurée est de 3200m/s. Décrivez son état de fissuration sachant que $V_{augite} = 7200\text{m/s}$, $V_{Qz} = 6050\text{m/s}$ et $V_{Plagioclases} = 6250\text{m/s}$.

$1/V_{Lc} = \sum_i C_i / V_{Li} = (0.3/6050) + (0.4/6250) + (0.30/7200) = 0.0001717824$, $V_{Lc} = 5821.32 \text{ m/s}$.
 $Ic = 100 \cdot (V_{Lm} / V_{Lc}) = (3200 / 5821) \cdot 100$. $Ic = 54.97 \%$. $D_f = 100 - 1.4n - Ic = 100 - (1.4 \cdot 3) - 50.97 = 44.83\%$ (la roche est moyennement fissurée).

2.1.6 : Analyse chimique (EN 1744-1) et réactivité aux alcalis (XP P18-594) :

A/ L'analyse chimique des granulats consiste en la détermination du pourcentage des composés chimiques nocifs suivants :

- chlorures solubles dans l'eau : les sels chlorures influent sur la teneur totale en chlorures et alcalins du béton et conduisent par conséquent à la corrosion des armatures incorporées dans les bétons, la valeur limite de la teneur en ions chlorure ne doit pas dépasser les 0.01 % (EN 12620 et NA 5043).

- sulfates solubles dans l'eau ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, H_2SO_4 ...) : la présence de sulfates dans les granulats peut engendrer des ruptures du béton par gonflement et expansion. La teneur en sulfates des granulats ne doit pas dépasser 0.2 % en masse.

- soufre total (SO_2 ...) : la teneur totale en soufre des granulats ne doit pas dépasser 1 % en masse.

- sulfures (CS_2 , H_2S , FeS_2 ...) : Notamment la pyrite FeS_2 dont l'oxydation peut engendrer la modification du p^{H} du milieu et dont les répercussions peuvent être des désordres géotechniques aux ouvrages du fait de gonflements dus à la création de nouvelles espèces minérales (de type sulfate). Il existe d'ailleurs des spécifications sur le dosage maximum admissible pour ces matériaux *réactifs*.

- composés organiques : les matières humiques affectent les bétons en augmentant le temps de prise et du durcissement et en réduisant la résistance à la compression des ciments et bétons, la proportion des impuretés organiques légères ne doit pas dépasser 0.5 % en masse pour les sables ou 0.1 % en masse pour les gravillons (EN 12620 et NA 5043).

- chaux, solubilité dans l'eau et perte au feu, ainsi que la détermination de la sensibilité à l'eau des fillers pour mélanges bitumineux.

B/ En plus de l'analyse chimique des granulats, la qualification de la **réactivité des granulats aux alcalis** (ou **l'alcali-réaction**) est très importante surtout dans le domaine des bétons.

Selon les normes FD P 18-542 (Mai 1994) et XP P 18-594 (Février 2004), on désigne par alcali-réaction un ensemble de réactions chimiques entre certaines formes de silice, de silicate ou de carbonates, pouvant être présentes dans les granulats, et les ions alcalins (Na^+ , K^+) présents dans la solution interstitielle du béton. Ces éléments alcalins peuvent provenir du ciment utilisé, de l'eau de gâchage, des adjuvants, des additions minérales et même des granulats composants le béton.

Sous certaines conditions et notamment en présence d'eau (humidité) et en l'absence de précautions particulières, ces réactions provoquent la formation d'un gel hydrophile (silicate alcalin), dont l'expansion engendre, des gonflements caractéristiques conduisant à des fissurations importantes et par conséquent une diminution des propriétés mécaniques : résistance à la compression, à la flexion, modification du module d'Young.

La démarche de qualification des granulats vis-à-vis de l'alcali-réaction impose d'identifier le type de granulats auquel on a à faire et les espèces réactives qui y sont contenues. Cela implique, d'une part la recherche d'espèces minérales réactives (généralement la silice amorphe ou cryptocristalline) par une identification pétrographique et chimique du granulats au sens large et d'autre part par la vérification de la potentialité de réactivité qui implique des essais de laboratoire rapides et à long terme.

2.2/ Identification des granulats issus de roches meubles : Les granulats issus de roches meubles sont constitués de roches sédimentaires détritiques non consolidés ou de mélanges de plusieurs roches de nature différente (faciès) et de plusieurs espèces minérales qu'il convient de déterminer sur le plan pétrographique. Ces matériaux meubles se présentent généralement sous forme de gisement appartenant à des horizons stratigraphiques « classiques ». Toute fois, étant donné leur mode de transport et de dépôt, ils forment généralement des gisements hétérogènes en ce qui concerne la granularité et la propreté. L'identification des roches meubles est basée sur :

-leur granularité, leur composition minéralogique et pétrographique, leur structure et leur porosité, leur indice de continuité, leur propreté et leur réactivité aux alcalis.

2.2.1/ Granularité (et hétérogénéités) : la granularité est déterminée par un procédé de tamisage (analyse granulométrique) par lequel est analysée la distribution dimensionnelle des grains, constituant un granulats ou un mélange granulaire et présentée sous forme de courbes granulométriques. La recherche de la plus grande compacité dicte l'essentiel des spécifications sur la granularité des granulats, le bon sens comprend que plus un mélange granulaire est compact, moins il est déformable et plus sa résistance est élevée, les vides que laissent entre eux les gros gravillons en contact peuvent être occupés par les gravillons plus petits et les vides qui subsistent encore peuvent être remplis par les sables et ainsi de suite jusqu'aux éléments les plus fins. De nombreuses méthodes théoriques ou expérimentales ont été proposées pour définir la granularité optimale conduisant à la meilleure compacité pratique, on peut à titre d'exemple citer les **courbes de TALBOT**. Pour les assises de chaussées, l'expérience a montré que l'on devrait se tenir dans un fuseau relativement étroit, en France, il est souvent fait référence au **fuseau ROBIN**. Pour les mélanges où le liant se présente sous forme granulaire, il convient évidemment d'en tenir compte pour définir le fuseau de spécification des granulats. En effet, il faudrait aussi tenir compte, lors de l'établissement de ce fuseau, de l'évolution granulométrique due à la mise en œuvre, pour les granulats les plus tendres en particulier. En plus de l'établissement des courbes

granulométriques, il faut faire attention aux variations horizontales et latérales dans le cas des gisements hétérogènes.

2.2.2/ Composition minéralogique et pétrographique : cette identification consiste à déterminer la répartition des différentes natures pétrographiques et minéralogiques dans chaque classe granulaire. Elle s'effectue à l'aide d'une loupe binoculaire ou d'un microscope polarisant. Dans le cas des fines, l'étude s'effectue aux rayons X et peut être complétée par une analyse chimique. La composition minéralogique des granulats varie souvent d'une classe granulaire à l'autre. Donc, avant de procéder à l'examen, il s'avère nécessaire de diviser les granulats en classes granulaires serrées pouvant être examinées chacune séparément. Les proportions des constituants (ainsi que les fragments de coquilles) peuvent ensuite être estimées en comptant les grains dans chaque classe.

On présente les résultats de manière à pouvoir lire aisément et de façon synthétique les répartitions constatées des natures pétrographiques et minéralogiques dans les classes granulaires. Comme dans le cas des roches massives, le degré d'altération des roches et minéraux et leur dureté ainsi que la présence et la proportion d'espèces minérales nuisibles (réactives, hydrophiles, matière organique) doivent être notées.

Lorsque le granulat ne comporte aucun élément prédominant, le matériau est déclaré hétérogène et son nom comporte les constituants principaux. Par exemple : sable quartzo-feldspathique hétérogène; gravier siliceux hétérogène.

2.2.3/ Structure : dans le cas des matériaux meubles, on peut pour chaque classe granulaire, faire un classement rapide entre les 5 structures principales.

2.2.4/ Masse volumique et porosité : la porosité ne s'applique qu'aux classes granulaires les plus grandes (sup à 4 mm), en dessous de cette dimension, la porosité tend vers zéro et joue un rôle moins important dans l'ensemble du granulat. Il est souvent nécessaire de faire les mesures de porosité en séparant les éléments par nature pétrographique.

2.2.5/ Etat d'altération : il se mesure comme pour les roches massives. Il faut préciser le % des éléments tendres et altérés dans les différentes classes granulaires.

2.2.6/ Indice de continuité : Il ne peut se mesurer que sur les éléments sup à 30 mm

2.2.7 : Propreté et pollution : En plus d'une répartition granulaire adéquate et d'une forme favorable, un granulat doit présenter une propreté satisfaisante pour être utilisé en bétons et mélanges bitumineux. Or, tous les granulats naturels contiennent plus ou moins d'impuretés et d'éléments fins ayant un effet néfaste sur les qualités principales du béton (résistance, imperméabilité, durabilité) et des mélanges bitumineux (adhérence), même à l'état de traces. Le manque de propreté d'un granulat est définie comme étant la présence d'éléments qui, même en faibles quantités, sont indésirables pour des raisons diverses, ces éléments de pollution (impureté) peuvent : soit inhiber les réactions de prise des liants hydrauliques, soit encore s'opposer à une bonne adhésivité des liants aux éléments granulaires (bétons et enrobés bitumineux), soit faire chuter les résistances des matériaux

composites et mélanger et conduit des variations de propriétés rhéologiques, soit encore entrainer des difficultés de mise e ouvre (les éléments de pollution perturbent l'hydratation du ciment et entraînent des défauts d'adhérence entre les granulats et la pâte ce qui influe sur la maniabilité des bétons). La pollution des granulats accroît la demande en eau, fait chuter les résistances des matériaux composites, augmente les retraits et nuit à la durabilité des bétons. Les éléments de pollution sont essentiellement :

- * Les matières organiques : particules de charbon, débris de végétaux..., et les fragments de coquilles

- * Les particules fines d'argile adhérentes au granulat et qui l'isolent du liant.

- * Les éléments inertes très fins (qui ne réagissent pas avec la solution, ex silice, calcite, FLD) de 200 μm à 20 μm de diamètre, ce qui les assimile à des argiles.

- * Les sulfates et sulfures, qui provoquent la désagrégation du béton par augmentation du volume (expansion) des parties qui les contiennent.

La liste non limitative du tableau ci-dessous correspond à des substances ayant chacune une action spécifique sur les liants. Les argiles toujours présentes dans les gisements de granulat constituent le risque le plus fréquent (alluvions mal lavées, découverte mal faite, élimination insuffisante) et ont en plus une action au niveau de la mise en œuvre qu'il y ait un liant ou non. Les autres substances nocives sont plus accidentelles ou typiques de gisements particuliers.

La propreté des granulats peut s'apprécier de différentes façons :

- Par la teneur globale en fillers, qui est un paramètre important dans la composition des bétons à ciment bitumineux.

- Pour les sables et graves, par l'essai d'équivalent de sable (qui permet de quantifier la notion de propreté) et par l'essai au bleu de méthylène (qui permet de qualifier la propreté par l'évaluation du degré d'activité des particules fines argileuses responsables, dans une large mesure, de désordres et de non qualité dans les bétons).

- Pour les gravillons, par l'essai de propreté superficielle (teneur en fines).

2.2.8 : Propriétés chimiques (EN 1744-1) et réactivité aux alcalis (P18-594): idem pour les granulats de roches massives.

Nature	caractéristiques	présence	action
Argiles	Grandes surfaces spécifiques, hydrophiles (absorbent l'eau)	Toutes les roches naturelles	Ecran vis-à-vis de tous les liants, réhydratation, déformations des bétons hydrauliques
Minéraux altérés, feldspaths	Sources d'argiles	Roches magmatiques	Idem
Micas	Assez grande surface spécifique	Toutes roches sauf calcaires	Ecran vis-vis des liants
Hydroxydes de fer	hydrophiles	latérites	Expansion des liants
Pyrite, marcassite	oxydables	Toutes les roches	Expansion (étringite) et ouverture
Gypse, anhydrite	Solubles, réactifs	Alluvions en climat sec	expansion
Chlorures	Réactifs	Sables et graviers marins	Corrosion des aciers dans BH
Opale, silice microcristalline	Réactifs	Toutes les roches	Expansion, fissuration BH
Acides organiques	Réactifs	alluvions	Retard ou absence de prise BH

Etringite : réaction sulfatique interne qui provoque un gonflement (expansion) et à terme une désagrégation du béton.

2.3/ Nom des roches, minerais et matériaux artificiels utilisés comme granulat : Il est commode de distinguer des familles regroupant les principaux noms des roches, minerais et matériaux artificiels. L'appartenance à une famille dépend de la composition minéralogique déterminée à partir de l'étude pétrographique des lames minces de roches au microscope polarisant :

	famille	Roches grenues	Roches microgrenues
Roches magmatiques	Granites Diorites Gabbros	Granite Syénite, aplite Granodiorite Diorites Gabbros	Microgranite rhyolite Trachyte Microgranodiorite, dacite Microdiorite andésite Dolérite, diabase, basalte Ophite, Pouzzolane
Roches métamorphiques		Calcaire cristallin (marbre) Amphibolite Gneiss migmatite Leptynite micaschiste	Schiste calcschiste Schiste tacheté Cornéenne, granulite quartzite
Roches sédimentaires	Carbonatées Silicatées	Calcaire, calcaire dolomitique Dolomie Alluvions calcaires, alluvions silico-calcaires Calcaire gréseux, conglomérat Grès, quartzite, chaille (chert), silex, arkose, grauwacke Alluvion siliceuse, sable, moraine, conglomérat	
minerais		Barytine, hématite, magnétite	
Matériaux artificiels		Argile expansée Schiste expansé Verre expansé Cendre volante	Laitiers de hauts fourneaux Scories d'aciérie Bauxite calcinée Fumée de silice
		Matériaux de démolition	

Chapitre 3 : Caractérisation physico-mécanique des granulats :

La réalisation d'infrastructures routières et d'ouvrages d'art de plus en plus performants nécessite l'utilisation des matériaux granulaires devant répondre à des critères très strictes de qualité qui dépendent, d'une part de la nature de la roche (propriétés mécaniques et physico-chimiques...) et d'autre part des caractéristiques liées à leur élaboration (dimension, forme, propreté...). Les granulats doivent être conformes à des exigences normatives (européennes EN, françaises NF, algériennes NA, ou autres ...) dans lesquelles chacune de ces propriétés est mesurée par des essais conventionnels. Les caractéristiques contrôlées par ces essais et les niveaux de valeurs recherchées (spécifications et exigences) sont fonction de la nature de l'ouvrage mais également des modes de mise en œuvre. Les caractéristiques physico-chimiques des granulats et matériaux naturels sont liées à leur composition pétrographique ainsi qu'à leur texture, ces caractéristiques ont une forte influence sur une partie des propriétés géotechniques des matériaux.

3.1 : propriétés géométriques des granulats : Les propriétés géométriques sont données notamment par l'analyse granulométrique, servant à définir le diamètre des grains (granulométrie) et leur distribution dimensionnelle (granularité), et par le coefficient d'aplatissement qui définit la forme ou la morphologie des grains de granulat. Ces propriétés jouent un rôle très important lors de la mise en œuvre des granulats. En fonction de ces propriétés, les granulats conditionnent la quantité des arrangements granulaires (formulation du béton) et forment le squelette de la structure (béton ou chaussée).

Les caractéristiques géométriques se résument en caractéristiques dimensionnelles (granularité des sables et graves, des gravillons, des ballasts et des fillers), de propreté (module de finesse et teneur en fines), et morphologiques (forme des gravillons : coefficient d'aplatissement et indice de forme, angularité...).

3.1.1 : Caractéristiques dimensionnelles :

3.1.1.1 : Granularité et analyse granulométrique :

La granularité est déterminée par un procédé de tamisage (analyse granulométrique) par lequel est analysée la distribution dimensionnelle des grains constituant un granulat, exprimée en pourcentage de masse, passant au travers d'un ensemble spécifié de tamis (passants à $2*D$, $1.4*D$, D , $D/1.4$, $D/2$, d , $d/2$).

Pour les besoins du cours, on définit les termes suivants (NA 5043 et XP P18-545) :

Catégorie : niveau d'une caractéristique d'un granulat, défini comme un intervalle entre deux valeurs ou comme une valeur limite. Il n'existe pas de relations entre les catégories des différentes caractéristiques.

Codes : des codes sont proposés pour les différents domaines d'utilisation des granulats. Ils peuvent associer des catégories de différentes caractéristiques pour simplifier l'écriture des

spécifications des marchés ou la désignation des produits, mais ne se substituent pas la désignation explicite par des catégories définies dans les normes.

Valeur type : valeur indicative du niveau d'une caractéristique choisie par le fournisseur pour représenter sa production de référence. La valeur type peut être assortie, ou non, d'une tolérance selon les indications des normes NA 5043 et XP P18-545.

Tolérance : Domaine de variation des valeurs d'une caractéristique de part et d'autre d'une valeur type.

Etendue (e) : double de la tolérance : domaine de variation du passant à un tamis donné ou du module de finesse (ce qui conduit $\text{tolérance} = e / 2$).

Limites inférieure (Li) et supérieure (Ls) : valeurs limites indiquées dans les tableaux des normes NA 5043 et XP P18-545, en présence d'une étendue. Elles précisent la zone dans laquelle doit se situer le **fuseau de régularité** et délimitent un fuseau appelé **fuseau de spécifications** (voir Figure 3.1).

Valeur spécifiée : inférieure (Vsi) et supérieure (Vss) :

Vsi = valeur type - tolérance, avec $Vsi \geq Li$, **Vss** = valeur type + tolérance, avec $Vss \leq Ls$

Exemple : Module de finesse valeur type 1.90 ; tolérance ± 0.35 conduit $Vsi = 1.55$ et $Vss = 2.25$. Si la tolérance n'est pas fixée, Vsi ou Vss sont données dans les tableaux des normes NA 5043 et XP P18-545.

Fuseau de régularité : couple de granularités déterminées à partir de la granularité type, en appliquant de part et d'autre du pourcentage de passant type **Xr** choisi par le fournisseur à chaque dimension de tamis utilisée les tolérances ($e/2$) indiquées dans les articles des normes NA 5043 et XP P18-545 (voir Figure 3.1). Ces valeurs deviennent alors les valeurs spécifiées supérieures Vss et spécifiée inférieure Vsi : **$Vss = Xr + \text{tolérance}$, $Vsi = Xr - \text{tolérance}$**

L'étendue e est donc égale à **$Vss - Vsi$** et la tolérance à **$(Vss - Vsi) / 2$** .

Si l'étendue n'est pas fixée, le fuseau de régularité est borné par les Vss et Vsi données dans les tableaux des normes NA 5043 et XP P18-545.

Granularité type : Ensemble des pourcentages de passants **Xr** (voir Figure 3.1) à travers un ensemble spécifié de tamis, choisis par le fournisseur pour représenter sa production de référence. Elle est notamment déclarée par le fournisseur dans la fiche technique de produit (FTP). Les données renseignées sont étendues aux d et D des gravillons.

Fuseau de fabrication : caractéristique d'une production de référence, le fuseau de fabrication est défini par les deux courbes granulométriques enveloppes établies pour chaque dimension de tamis à partir de : **$Xf \pm 1,25 * sf$** où **Xf** : moyenne des contrôles du fournisseur, **sf** : estimation de l'écart-type. Le fuseau de fabrication doit être inclus entièrement dans le fuseau de régularité. Sa définition requiert au moins les 15 analyses les plus récentes datant de moins de six mois de production, le nombre d'analyses est porté à 20 pour les fillers.

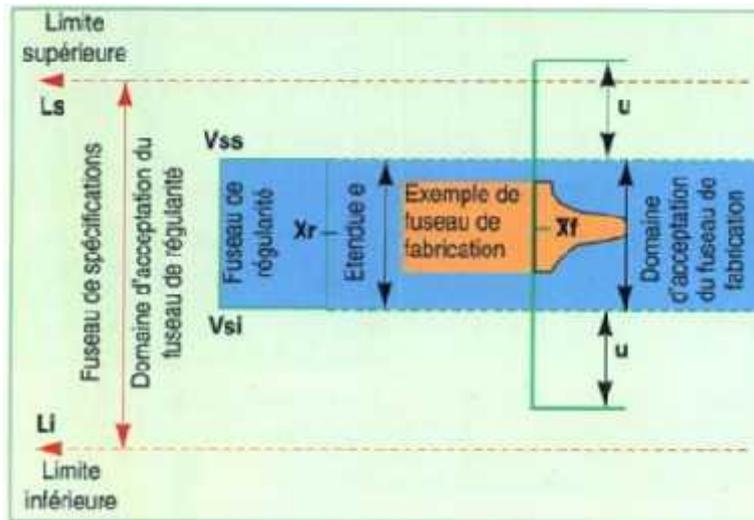


Figure 3.1 : Position relative des différents fuseaux pour une dimension donnée

3.1.1.2 : Classe granulaire : un ensemble de granulat constitue une classe granulaire d/D caractérisée par la petite et la grande dimension de ses grains (granulat qui passe sur le tamis D et retenu sur le tamis d). Cette désignation admet que des grains puissent être retenus sur le tamis supérieur (refus sur D) et que d'autres puissent passer au travers du tamis inférieur (passant à d), dans des limites précises selon leurs utilisations.

Les dimensions de d et D sont choisies dans la série de tamis suivante : 0.063-0.08-0.1-0.125-0.16-0.2-0.25-0.315-0.4-0.5-0.63-0.8-1-1.25-1.6-2-2.5-3.15-4-5-6.3-8-10-12.5-14-16-20-25-31.5-40-50-63-80-100-125 mm (Les dimensions soulignées sont celles de la série de base préconisée par NF EN 933-2).

Selon la norme XP P18-545 (Février 2004-Mars 2008), on distingue les classes de granulats suivantes ($D/d > 1.4$) :

A/ Fillers : granulat dont la plupart des grains passe au tamis de 0.063 mm ($D < 2$ mm avec au moins 70 % de passant au tamis 0.063 mm (63 μ m)), il peut être ajouté aux matériaux de construction pour leur conférer certaines propriétés (exemple 0/0.125, 0/2).

B/ Fines : fraction granulaire d'un granulat qui passe entièrement au tamis de 0.063mm.

C/ Sables d/D : le sable peut résulter de l'altération naturelle de roches massives ou meubles et/ou de leur concassage, ou encore du traitement de granulats artificiels :

Granulat pour :	Béton et mortier NF EN12620 NF EN 13139	Mélanges bitumineux NF EN 13043	Matériaux traités et non traités NF EN 13242
$D \leq$	4 mm	2 mm	6.3 mm
$d =$	0	0	0

Exemple : classes des sables utilisées dans la confection de béton et mortier : 0/1, 0/2,0/4

D/ Gravillons d/D : Désignation des granulats d/D dont :

Granulat pour :	Béton et mortier NF EN12620 NF EN 13139	Mélanges bitumineux NF EN 13043	Matériaux traités et non traités NF EN 13242
D	$4 \leq D \leq 63$ mm (béton) D = 4 (mortier)	$2 < D \leq 45$ mm	$2 < D \leq 90$ mm
D	≥ 2 mm (= 2 mortier)	≥ 2 mm	≥ 1 mm

Exemple : classes des gravillons utilisées dans la confection de béton et mortier : 2/4, 2/6.3, 2/8, 2/10, 2/16, 2/20, 4/10, 4/16, 4/22.5, 4/31.5, 4/40...6.3/16, 6.3/20, 6.3/31.5, 8/14, 8/20, 8/40...10/20, 10/31.5, 10/40, 14/16, 16/31.5, 16/63...20/63, 20/45, 22.4/45, 22.4/63...

E/ Graves 0/D : granulats formés d'un mélange de gravillons et de sables, elles peuvent être aussi produites directement.

Granulat pour :	Béton et mortier NF EN12620 NF EN 13139	Mélanges bitumineux NF EN 13043	Matériaux traités et non traités NF EN 13242
D	$4 \leq D \leq 45$ mm	$2 < D \leq 45$ mm	$6.3 < D \leq 90$ mm
D	0	0	0

Exemple : classes des graves utilisées dans la confection de béton : 0/6.3, 0/8, 0/10, 0/11.5, 0/12.5, 0/14, 0/16, 0/20, 0/22.4, 0/31.5, 0/40 et 0/45

F/ Ballast d/D : où $d \geq 25$ mm et $D \leq 50$ mm (20/32, 31.5/50). Ils sont utilisés comme assises des voies ferrées.

3.1.1.3 : Analyse granulométrique par tamisage (EN 933-1) : L'analyse granulométrique a pour objet la détermination de la distribution dimensionnelle des grains (granularité) constituant un granulat ou une classe granulaire (d'origine naturelle ou artificielle) dont les dimensions sont comprises entre 0,063 et 90 mm. L'essai consiste à séparer (fractionner), au moyen d'une série de tamis (tamisage par lavage suivi du tamisage à sec), un matériau en plusieurs classes granulaires de dimension décroissantes (Figure 3.2).



Figure 3.2 : série de tamis à mailles carrées et tamiseuse pour analyse granulométrique

Les masses de grains retenues sur les différents tamis sont rapportées à la masse initiale de matériau. Les pourcentages cumulés passant à travers chaque tamis sont présentés sous forme numérique et sous forme graphique (courbes granulométriques).

La masse de chaque prise d'essai doit être conforme au tableau suivant, pour des granulats de masse volumique comprise entre 2,00 Mg/m³ et 3,00 Mg/m³ :

D de la classe granulaire (maximum) (mm)	Masse de la prise d'essai (minimum) (Kg)
90	80
63	40
32	10
16	2.6
8	0.6
≤ 4	0.2

Pour tracer la courbe granulométrique, il suffit de porter les divers pourcentages des tamisât cumulés ① ou des refus cumulés ③ sur une feuille semi-logarithmique (figure 3.4) :

- * **en abscisses** : les diamètres des tamis utilisés, sur une échelle logarithmique
- * **en ordonnées** : les pourcentages correspondants sur une échelle arithmétique.

La courbe granulométrique doit être tracée de manière continue et peut ne pas passer par tous les points. La forme de la courbe granulométrique obtenue apporte les renseignements suivants : - Les dimensions d et D du granulat, - La plus ou moins grande proportion d'éléments fins,- la continuité ou la discontinuité de la granularité.

Ouverture des tamis (mm)	Masse de refus (R _i) (kg)	Pourcentage de refus (R _i /M ₁) × 100	Pourcentages cumulés de tamisât 100 – Σ((R _i /M ₁) × 100)
	R ₁		
	R ₂		
			Au nombre entier le plus proche
Matériau resté au fond P =			

3.1.1.4 : teneur en fines :

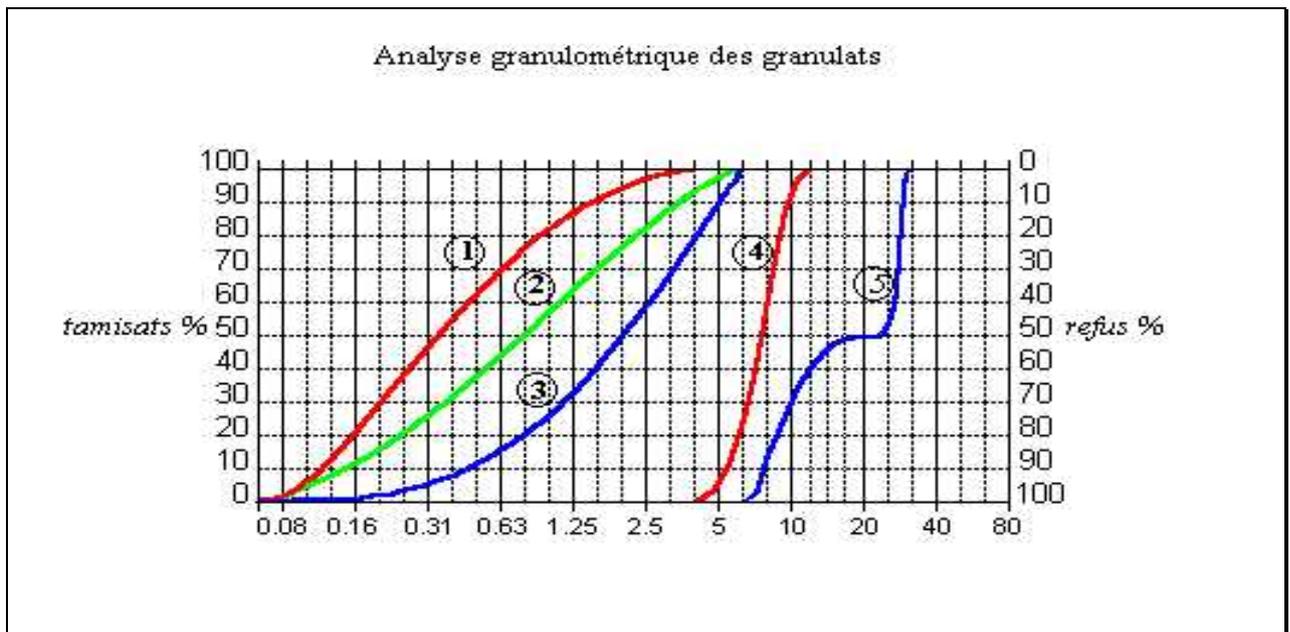
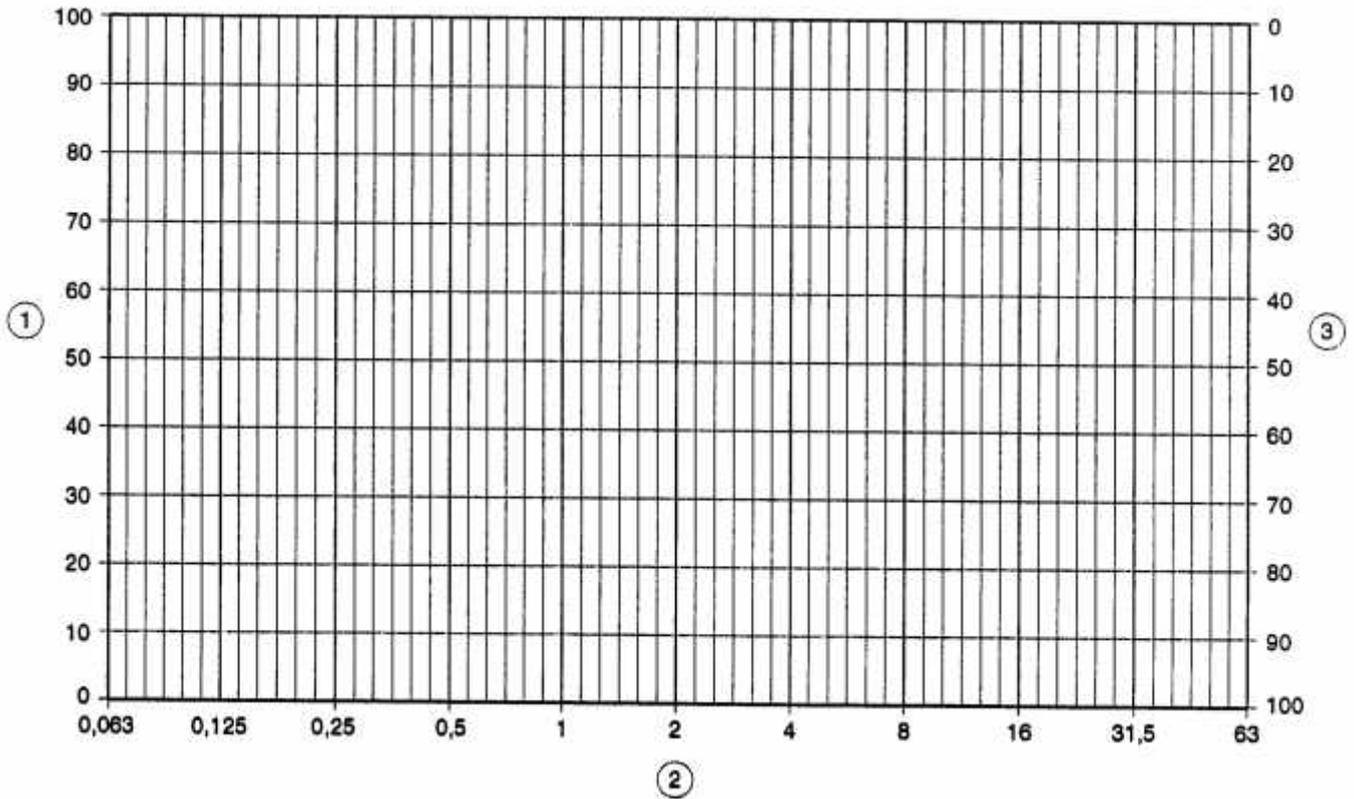
Le pourcentage de fines (f) passant à travers le tamis de 0.063mm (63µm) se calcule conformément à l'équation suivante : $f = ((M_1 - M_2) + P) / M_1 * 100$ où :

M₁ est la masse séchée de la prise d'essai, en kilogrammes ;

M₂ est la masse séchée du refus au tamis de 63 µm, en kilogrammes ;

P est la masse du tamisât restant dans le fond, en kilogrammes.

Pour vérifier l'exactitude de l'essai, la valeur $\{M_2 - [\sum (R_i + P)] / M_2\} * 100$ doit être < 1 %.



- ① Sable à majorité de grains fins ② Sable plutôt grossier
- ③ Sable normal ④ Gravillon 5/10 à granulométrie continue
- ⑤ Gravillon 8 / 25 à granulométrie discontinue

Figure 3.4 : Présentation graphique des résultats d'analyse granulométriques

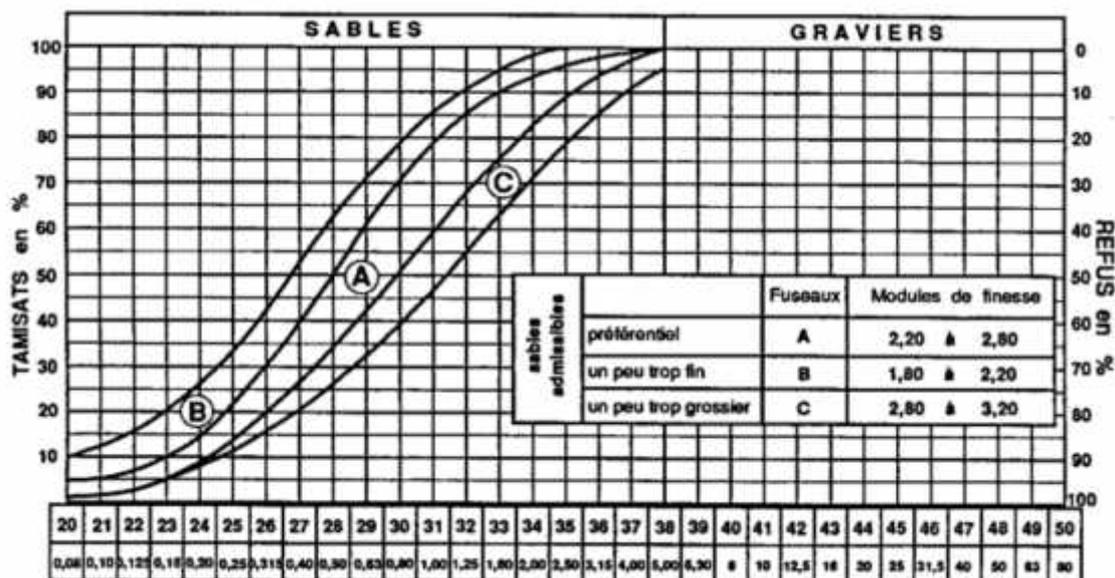
L'étalement de la granulométrie est précisé par les facteurs (ou coefficients) d'uniformité ($C_u = d_{60}/d_{10}$) et de courbure ($C_c = d_{30}^2/(d_{10} \cdot d_{60}) = C_u \cdot (d_{30}/d_{60})^2$) pour une division granulométrique donnée :

Division granulométrique	Qualificatif	C_u	C_c
Grave 0/60 mm	Bien gradué	$C_u > 4$ et $1 < C_c < 3$	
	Mal gradué	$C_u < 4$ ou $C_c < 1$ ou $C_c > 3$	
Sable 0.06/2 mm	Bien gradué	$C_u > 6$ et $1 < C_c < 3$	
	Mal gradué	$C_u < 6$ ou $C_c < 1$ ou $C_c > 3$	

En règle générale : $C_u > 2 \rightarrow$ granulométrie étalée, $C_u < 2 \rightarrow$ granulométrie uniforme ou serrée. $1 < C_c < 3 \rightarrow$ matériau bien gradué (la continuité est bien répartie : matériau plus dense). $C_c < 1$ ou $C_c > 3 \rightarrow$ matériau mal gradué (la continuité est mal répartie).

3.1.2 : Le module de finesse (FM) des sables (0/4) permet de contrôler la régularité des fournitures en sables, il est défini, par la norme EN 12620, comme la somme des pourcentages cumulés, en masse, des refus sur la série de tamis suivante (mm), exprimé en pourcentage % : $FM = \sum((> 4) + (> 2) + (> 1) + (> 0.5) + (> 0.25) + (> 0.125))/100$. (NF EN 12620)

Un bon sable à béton doit avoir un module de finesse d'environ 1.5 à 2,8.



Fuseau des sables admissibles

3.1.3 : Forme des granulats (gravillons) :

3.1.3.1 : Coefficient d'aplatissement (EN 933-3): Le coefficient d'aplatissement des granulats permet de caractériser la forme plus ou moins massive des granulats dont la dimension est comprise entre 4 et 80 mm et de suivre la régularité des fournitures des gravillons. L'essai consiste à effectuer un double tamisage d'abord sur tamis à mailles carrées (4-5-6.3-8-10-12.5-16-20-25-31.5-40-50-63-80) puis passé sur des grilles à fentes parallèles d'une largeur

d'écartement égale à D/2 (4/5 : 2.5, 5/6,3 : 3.15, 6,3/8 : 4, 8/10 : 5, 10/12,5 : 6.3, 12.5/16 : 8, 16/20 : 10, 20/25 : 12.5, 25/31.5 : 16, 31,5/40 : 20, 40/50 : 25, 50/63 : 31.5, 63/80 : 40).

Le coefficient d'aplatissement des gravillons **A** (ou **Flakiness Index FI**) d'une classe granulaire correspond au pourcentage pondéral des éléments plats passant à travers la grille à fentes correspondante : **FI (ou A) = (M₂ / M₁) * 100** : M₁ est la masse de chaque granulat élémentaire d_i /D_i (en grammes) ; M₂ est la masse de passants sur la grille à fentes correspondante d'écartement D_i /2 (en grammes).

Application : calculer le coefficient d'aplatissement du granulat suivant : Classe granulaire 8/15, masse de l'échantillon M = 3000 gr, masse de la prise d'essai M₀ = 2988 gr, refus au tamis 80 mm R = 0, passant au tamis 4 mm P = 12 gr, matériau éliminé R+P = 12 gr



Tamisage sur tamis		Tamisage sur grilles à fente		
Classes granulaires d/D mm	R _i (gr)	Ecartement des fentes de la grille (mm)	Passant m _i (gr)	A _i = (m _i / R _i)*100
12/16	571	8	98	17,16 %
10/12,5	2000	6,3	358	17,90 %
8/10	376	5	97	25,80 %
M ₁ =∑ R _i = 2947 gr M ₀ = 2988 gr		M ₂ =∑ m _i = 553 gr		
A= (M₂ / M₁)*100 = 18,76 %				
Vérification : {M ₀ -[M ₁ +∑ (R+P)]/ M ₀ }*100= 0,94 % <1 %				

Selon leur origine, leur nature et leur mode d'élaboration, les granulats peuvent avoir des formes sphériques, cubiques, nodulaires, plates ou allongées. Ces caractéristiques ainsi que l'état de surface des grains influent :

- sur l'aptitude à la mise en place du béton frais, sa tenue au démoulage immédiat et la résistance mécanique du béton durci,

- à la compacité des remblais et couches de forme, à la rugosité des couches de roulement, l'adhérence avec les liants hydrocarbonés (bitume) dans les chaussées...

Les éléments plats et allongés correspondent à une mauvaise forme (CA élevé > 35 %) car ils se fragmentent plus facilement que les éléments plus cubiques et ils ont une épaisseur à «user» moindre. De plus, ils ne permettent pas à réaliser des bétons très compacts, parce qu'ils entraînent un excès de liant (dû au vide intergranulaire qui doit être rempli par la pâte de ciment) et diminuent la maniabilité (mise en œuvre) ce qui risque d'être compensé par un accroissement du dosage en eau et favorise alors la ségrégation et l'apparition des défauts d'aspect (mauvaise compacité, bétons poreux en général). La présence d'éléments plats confère une mauvaise adhérence du granulats avec la pâte de ciment ce qui entraîne une légère diminution de la résistance mécanique des gravillons, par exemple le LA augmente de 1 point quand le % d'éléments plats augmente de 10. Par ailleurs, en techniques routières (surtout dans le cas des enduits superficiels des routes à fortes circulations), les spécifications sont sévères, les éléments plats influent sur le bon arrangement des grains en laissant un vide intergranulaire, entraînant une mauvaise compacité, mais aussi essentiellement sur la résistance à la fragmentation et à l'attrition et conduisant à une dégradation prématurée de la chaussée. Les formes aplaties conduisent à des couches de roulement trop glissantes, leur présence nuit à la qualité de la mosaïque créée par la couche mono granulaire de gravillons et à la microrugosité de la texture superficielle de la chaussée ce qui ne permet pas à une bonne adhérence chaussée/pneumatique, les risques de glissance sont alors. Enfin, on se compactant à plat, les éléments de mauvaise forme occupe une surface au sol plus élevée ce qui conduit à un surdosage apparent en gravillons avec les risques de rejet qui en résulte.

La forme des granulats calcaires est meilleure (CA ~ 6) que celle des granulats de basalte et de silexite, ceci implique une difficulté relative au concassage due à leur aspect trop massif. Les granulats de silexite ont une forme plus plate (CA ~ 15) que ceux de basalte (CA ~ 25).

Un gravillon de forme favorable (sphérique, cubique ou nodulaire) présente un CA généralement compris entre 5 % et 20 %. Les granulats de forme roulée favorisent une meilleure maniabilité et par conséquent une bonne compacité des bétons. Les spécifications actuelles tendent à demander pour la plupart des usages, un CA inférieur à 25 %. (Voir tableaux de spécifications).

3.1.3.2 : Indice de forme (NF EN 933-4) : (Essai non recommandé en France) : Cette norme spécifie une méthode de détermination de l'indice de forme (Shape Index **SI**) des gravillons et cailloux d'origine naturelle ou artificielle, y compris les granulats légers.

La méthode d'essai est applicable à la fraction granulaire 4/63 mm. Chaque grain d'un échantillon de gravillons et cailloux est classé sur la base du rapport de sa longueur L (dimension maximale d'un grain, définie par la distance maximale entre deux plans parallèles tangents à la surface du grain) à son épaisseur E (dimension minimale d'un grain définie par la distance minimale entre deux plans parallèles tangents à la surface du grain). Les mesures se font l'aide d'un pied à coulisse. L'indice de forme **SI** est défini comme étant la masse de

grains dont le rapport des dimensions L/E est supérieur à 3 (grains non cubiques), exprimée en pourcentage de la masse sèche totale des grains soumis à l'essai :

Enregistrer la masse de la fraction granulaire d_i/D_i et la noter M_1 . (utiliser les tamis dont les mailles sont les plus proches de d et D et choisies dans la série : 4 mm - 5,6 mm - 8 mm - 11,2 mm - 16 mm - 22,4 mm - 31,5 mm - 45 mm - 63 mm).

Évaluer la longueur L et l'épaisseur E de chaque grain à l'aide d'un pied à coulisse et séparer les grains ayant un rapport dimensionnel $L/E > 3$, ces grains sont classés comme non cubiques. Peser les grains non cubiques, leur masse est notée M_2 : **SI = $(M_2/M_1)*100$.**

3.1.3.3 : Angularité (NF EN 933-5 et NF EN 933-6) : L'angularité ne se mesure que sur les granulats alluvionnaires ou marins. NF EN 933-5 : Détermination du pourcentage de surfaces cassées dans les gravillons. NF EN 933-6 : Évaluation des caractéristiques de surface - Coefficient d'écoulement des granulats.

Les matériaux alluvionnaires qui n'ont pas subi de concassage ont des formes arrondies, alors que les granulats concassés présentent des arêtes vives et ont une forte angularité. A compacité ou indice de vides égal, une bonne angularité confère au mélange granulaire une meilleure stabilité mécanique : l'angle de frottement interne augmente d'environ 7° dans un essai triaxial quand on passe d'un matériau entièrement roulé à une roche massive concassée. Par contre, la présence d'éléments roulés assure une meilleure maniabilité qui, au moment de la mise en œuvre, facilite le serrage et l'obtention d'une bonne compacité. On se retrouve ainsi en face d'un dilemme qui s'applique également dans le cas de la granularité : faut-il choisir les critères conduisant à la meilleure résistance, avec un risque de déboire si l'on ne peut pas obtenir une compacité suffisante, ou bien faut-il faciliter les conditions de mise en œuvre pour obtenir une bonne compacité, en admettant des performances mécaniques plus faibles du mélange granulaire ? La réponse qu'on donne actuellement à cette question dépend des techniques et moyens mis en œuvre.

Pour les bétons hydrauliques où le dosage en liant est élevé, on privilège la recherche d'une bonne maniabilité en utilisant de préférence des matériaux roulés. Au contraire pour les assises de chaussées, on met plutôt l'accent sur l'obtention d'une meilleure stabilité du mélange granulaire soit parce qu'il n'y a pas de liant (graves non traitées), soit parce que la prise du liant est lente et qu'il faut assurer avant celle-ci une bonne stabilité de l'assise (grave-laitier), soit encore parce que la rigidité du liant est faible (graves-bitume).

Pour les graves 0/D et les gravillons d/D, l'angularité est appréciée d'une manière indirecte par l'indice de concassage IC qui est le % en masse d'éléments supérieurs à D de la grave alluvionnaire d'origine soumise au concassage. Dans le cas d'une recombinaison, IC est donné par la moyenne pondérée des indices de concassage des différents composants.

Pour lutter contre la glissance des chaussées, on cherche à éviter les gravillons présentant des faces rondes, les spécifications sont alors plus sévères et font appel au rapport de concassage RC qui est le rapport de la plus petite dimension du matériau d'origine soumis au premier concassage au D du gravillon obtenu. Des rapports de concassage de 4 voire de 6

sont demandés pour les couches de roulement des chaussées où les vitesses des véhicules sont élevées.

L'angularité est mesurée par l'essai «Coefficient d'écoulement des granulats *CE*» décrit dans La norme NF EN 933-6, qui mesure le temps, exprimé en secondes, mis par un volume spécifié de granulats pour s'écouler à travers une ouverture donnée, dans des conditions précises, en utilisant un appareillage normalisé (angulomètre), il est nécessaire de vibrer l'ensemble du dispositif pour assurer l'écoulement. Cette caractéristique est liée à l'angularité des sables (0/4 ou inférieure) et gravillons (4/20) et peut se substituer aux notions d'indice et de rapport de concassage ou être utilisée comme valeur absolue. Cette méthode basée sur le frottement des particules intègre toutes les caractéristiques géométriques des granulats : état de surface des grains (forme, texture, % es surfaces concassées), forme des grains et granularité.

Une bonne relation existe entre le coefficient d'écoulement des gravillons, l'indice de concassage et le nombre de faces rondes subsistant dans le matériau. Une mention doit être faite de la notion d'état de surface. La surface d'une particule provient toujours d'une rupture, elle peut évoluer par la suite si la particule subit un transport, fluvial par exemple, qui tend à polir ou dépolir les surfaces. La rugosité d'une surface de rupture dépend de la dimension des minéraux de la roche, plus le grain est fin comme le silex par exemple, plus la surface est lisse. Il est évident que cette caractéristique joue un rôle non négligeable vis-à-vis de l'angle de frottement interne des milieux granulaires au même titre que l'angularité.

3.2 : Propriétés physiques des granulats : Elles sont définies par la masse volumique (réelle, apparente et absolue), la porosité des fillers et le coefficient d'absorption d'eau des sables et gravillons, la propreté des sables et graves (ES, propreté superficielle et VB).

Ces propriétés dépendent directement de la nature du matériau, leur prise en compte est indispensable au moment de la mise en œuvre des granulats (formulations des bétons).

3.2.1/ masse volumique : ce paramètre permet de déterminer la masse ou le volume des différentes classes granulaires (de dimension inférieure à 63 mm) à malaxer avec le ciment et l'eau pour l'obtention d'un béton dont les caractéristiques sont imposées.

La masse volumique d'un corps est la masse de l'unité de volume de ce corps. Elle s'exprime en Mg/m^3 (mégagrammes par mètre cube), t/m^3 (tonnes par mètre cube), en kg/dcm^3 ou en gr/cm^3 . Le volume absolu d'une masse connue de matériaux est mesuré par déplacement d'un volume de liquide (eau dans le cas courant), en fonction de la précision recherchée et de la nature de granulat, on utilise la méthode dite de l'éprouvette graduée, la méthode au pycnomètre ou la méthode par pesée hydrostatique (panier en treillis métalliques).

De même que l'on distingue le volume apparent et le volume absolu, on distingue :

3.2.1.1/ Masse volumique apparente ρ_{app} (ou en vrac ρ_b) : c'est le rapport entre la masse de granulats secs (séché en étuve) et le volume qu'il occupe sans compactage dans un conteneur (cylindrique étanche en métal), y compris le volume des vides intergranulaires (**EN 1097-3 : Détermination de la masse volumique en vrac et de la porosité intergranulaire**) :

$\rho_b = (m_2 - m_1) / V$: où : ρ_b est la masse volumique en vrac, en mégagrammes par mètre cube ; m_1 est la masse du conteneur et de l'échantillon, en kilogrammes ; m_2 est la masse du conteneur vide, en kilogrammes ; V est la capacité (volume) du conteneur en litres.

3.2.1.2/ Masse volumique réelle $\rho_{réel}$: c'est le rapport entre la masse de l'échantillon séché en étuve et le volume qu'il occupe dans l'eau, y compris les pores fermés et ceux accessibles à l'eau, sans tenir compte des vides intergranulaires, c'est la masse volumique de la roche sèche (**EN 1097-6 : Détermination de la masse volumique réelle et du coefficient d'absorption d'eau**). Le volume est calculé à partir de la masse du volume d'eau déplacé, déterminée par pesée selon la méthode au pycnomètre (figure 3.5).

Mode opératoire : Immerger une prise d'essai préparée dans le pycnomètre rempli d'eau à (22 ± 3) °C et éliminer l'air occlus en faisant tourner et osciller doucement le pycnomètre en position inclinée. Placer le pycnomètre dans le bain d'eau et maintenir la prise d'essai à une température de (22 ± 3) °C pendant $(24 \pm 0,5)$ h. À l'issue du trempage, retirer le pycnomètre du bain d'eau et éliminer tout reste d'air occlus. Faire déborder le pycnomètre en rajoutant de l'eau et placer le couvercle en évitant de piéger de l'air dans le récipient. Puis sécher l'extérieur du pycnomètre et le peser (M_2).

Retirer les granulats de l'eau et les laisser s'égoutter quelques minutes. Remplir à nouveau le pycnomètre avec de l'eau et remettre le couvercle comme précédemment. Puis sécher l'extérieur du pycnomètre et le peser (M_3). Transférer la prise d'essai égouttée sur l'un des chiffons secs. Sécher doucement en surface les granulats, puis les transférer sur un deuxième chiffon une fois que le premier n'absorbe plus d'eau. Bien étaler, sur ce chiffon, les granulats en une couche simple et les laisser exposés à l'air libre mais à l'abri des rayons du soleil ou de toute autre source de chaleur jusqu'à ce que les films d'eau visibles aient disparu, les granulats gardant toutefois un aspect humide.

Transférer la prise d'essai saturée et séchée en surface sur un plateau et peser les granulats. Sécher les granulats dans une étuve ventilée à une température de (110 ± 5) °C jusqu'à masse constante (M_4). La masse volumique réelle déterminée par séchage à l'étuve (en Mg/m^3) est donnée par la formule : $\rho_{réel} = \rho_w [M_4 / \{M_1 - (M_2 - M_3)\}]$ où ρ_w est la masse volumique de l'eau à la température d'essai exprimée en mégagrammes par mètre cube (en général égale à $1 Mg/m^3$), M_1 est la masse de la prise d'essai des granulats saturés et superficiellement secs dans l'air, en grammes ; M_2 est la masse du pycnomètre contenant l'échantillon de granulats saturés et l'eau, en grammes ; M_3 est la masse du pycnomètre rempli d'eau uniquement, en grammes ; M_4 est la masse dans l'air de la prise d'essai séchée à l'étuve, en grammes.

Conformément à la norme XP P 18-540, les granulats sont dits légers si $\rho_{réelle} < 2 Mg/m^3$ ($2000 Kg/m^3$) et courants si $\rho_{réelle} \geq 2 Mg/m^3$.

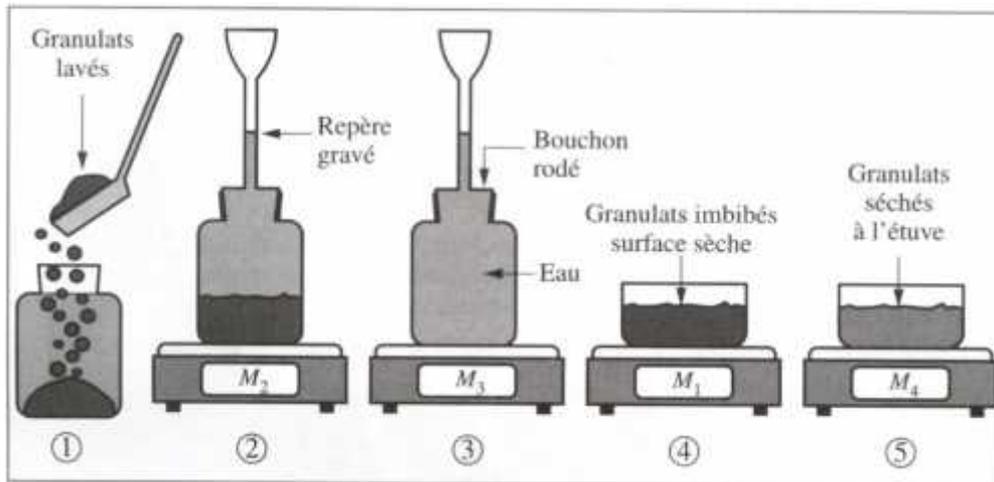


Figure 3.5 : Principales étapes de mesure de la masse volumique au pycnomètre

3.2.1.3/ Masse volumique absolue ρ_{abs} : c'est le rapport entre la masse de l'échantillon séché en étuve et le volume qu'il occupe dans l'eau, y compris les pores fermés (formant la porosité fermée), mais à l'exclusion de ceux accessibles à l'eau (figure 3.6). Elle est déterminée aussi par la méthode au pycnomètre. La masse volumique absolue (en Mg/m^3) est donnée par la formule : $\rho_{abs} = \rho_w [M_4 / \{M_4 - (M_2 - M_3)\}]$.

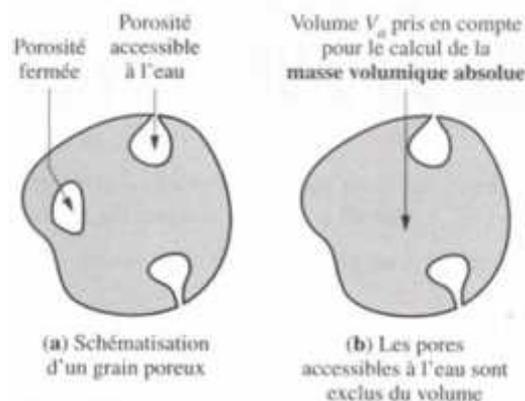


Figure 3.6: Prise en compte du volume des pores dans le calcul de la masse volumique absolue

A titre d'exemple la ρ_{abs} des granulats silico-calcaires est prise égale en première approximation à $2.65 t/m^3$ avec $\rho_{réel} \leq \rho_{abs}$.

3.2.2/ Coefficient d'absorption d'eau : rapport de l'augmentation de masse d'un échantillon de granulat à sa masse sèche (après passage à l'étuve), du fait de la pénétration de l'eau dans les pores accessibles à l'eau, suite à l'immersion de l'échantillon dans l'eau pendant 24h (EN 1097-6 : Détermination de la masse volumique réelle et du coefficient d'absorption d'eau et NF P18-554). Il est déterminé par la méthode au pycnomètre et se calcule en pourcentage de la masse sèche : $WA_{24} = \{100 * (M_1 - M_4)\} / M_4$.

Le coefficient d'absorption constitue donc une mesure des pores accessibles à l'eau, une valeur élevée est défavorable pour la durabilité des bétons car elle facilite la carbonatation,

la pénétration de l'eau et des chlorures, et la dégradation par le gel-dégel. Elle nuit aussi au maintien de la maniabilité du béton frais, ce qui peut se compenser par un pré-mouillage des granulats. Une absorption d'eau (ou porosité) élevée diminue le module d'élasticité et accroît le fluage. Par contre une très faible absorption d'eau favorise le ressuage (séparation d'une phase liquide au cours d'un alliage et perte d'eau, le reste de la masse restant solide).

Les spécifications actuelles tendent à demander pour la plupart des usages, une valeur V_{ss} de WA_{24} inférieur à 5 %.

Le coefficient d'absorption d'eau peut indiquer sur la sensibilité des granulats à l'action du gel-dégel s'il est supérieur à 1 %. Toutefois quelques granulats ont une résistance au gel-dégel satisfaisante (adéquante) et présentent un coefficient d'absorption nettement supérieur à 1 % (calcaires et grès jurassiques $WA_{24} \geq 4$ %, calcaires permians et grès dolomitiques carbonifères $WA_{24} \geq 2$ %).

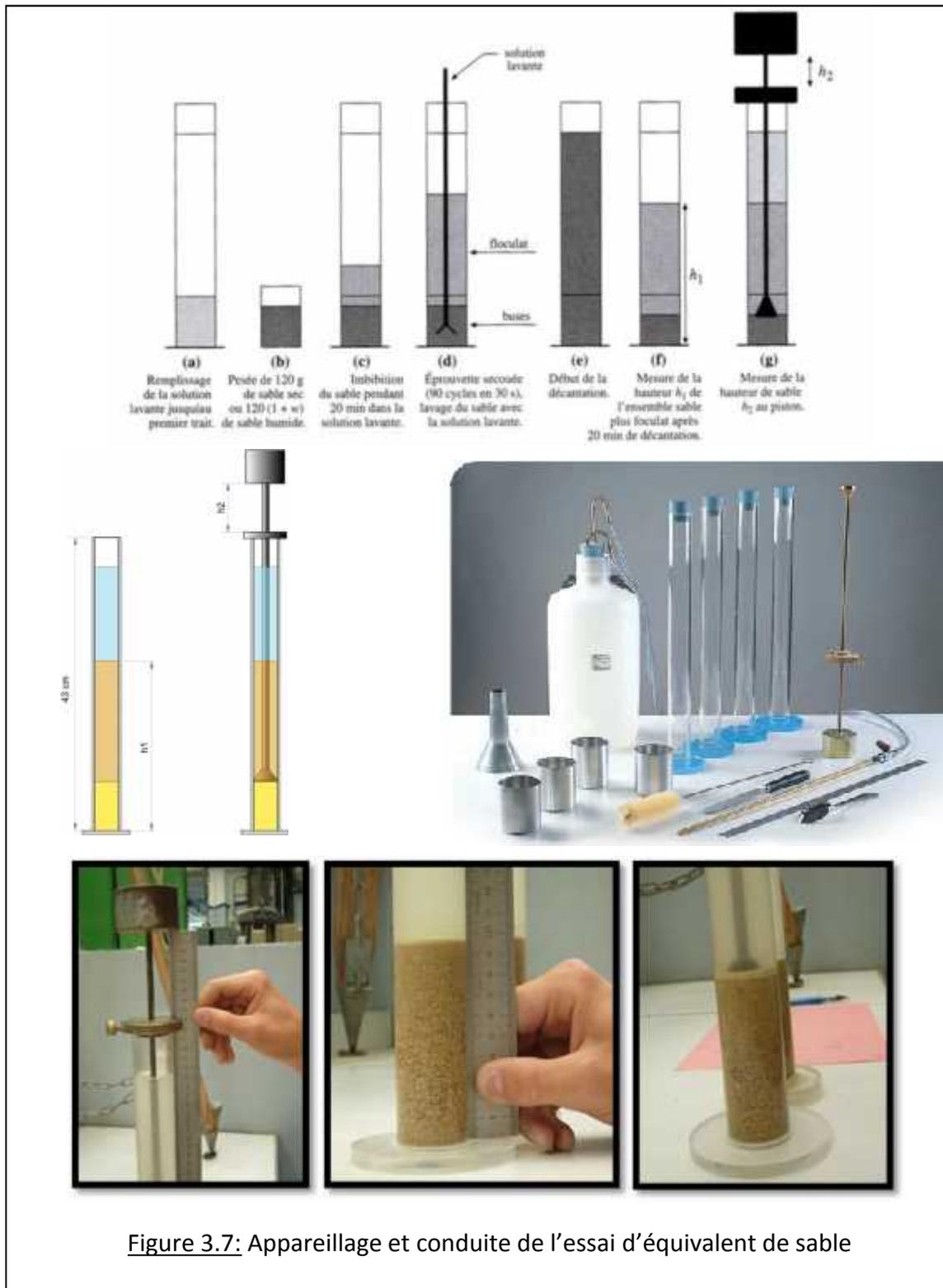
3.2.3/ La porosité (NF P18-554) : les pores sont assez facilement détectés en mesurant le volume d'eau (volume des vides V_v) contenu dans le granulat après saturation complète. La porosité est définie comme le rapport du volume des vides (espace poreux) contenus dans les grains d'un granulat et accessibles à l'eau, au volume réel de l'échantillon V_t , elle est donnée par la formule : $n = (V_v/V_t) * 100 = 1 - (\rho_r / \rho_a)$.

3.2.4/ Détermination de la porosité intergranulaire du filler sec compacté (EN 1097-4) appelée porosité rigden v : l'essai sert à déterminer l'aptitude des fillers à fixer du bitume sur les pores intergranulaires (Porosité intergranulaire : volume d'espace rempli d'air dans le filler, exprimé en pourcentage du volume total du filler après compactage à sec selon une méthode normalisée). Les spécifications demandent V_{ss} 45 et V_{si} 28.

3.2.5 / propreté des sables et graves (ES, propreté superficielle et VB) : Tous les granulats naturels contiennent plus ou moins d'impuretés et d'éléments fins, les essais de propreté donnent une estimation quantitative et qualitative des fines ayant un effet néfaste sur les qualités principales du béton (résistance, imperméabilité, durabilité) et des mélanges bitumineux (adhérence), même à l'état de traces.

3.2.5.1 : Propreté des sables et graves : se sont les sables naturels ou concassés et les graves qui posent les problèmes les plus délicats au point de vue de la propreté. Cette dernière est mesurée par l'essai d'équivalent de sable **ES (EN 933-8)**, son but est l'évaluation quantitative des fines argileuses (particules < 0.063 mm) contenues dans la fraction 0/2 (ou 0/4) des sables destinés à la confection des bétons ou des graves. L'essai consiste à mettre en suspension les fines à l'aide d'une solution lavante (qui détache les revêtements argileux des particules de sable) puis de les laisser se déposer au fond d'une éprouvette transparente et gradué, pendant 20 min. La proportion de fines (floculat) par rapport au reste de l'échantillon est alors mesurée puis calculée par la formule : $Es = (H_2 / H_1) * 100$ où H_1 : hauteur du sable propre. H_2 : hauteur totale de l'échantillon (sable + fines).

Plus ES est élevé, moins le matériau contient d'éléments fins nuisibles (argiles par exemple).



L'essai d'équivalent de sable apporte des réponses satisfaisantes aux problèmes des argiles pour les BH tant que leur teneur en fines reste voisine de 2 %, mais au-delà de cette teneur, l'essai comporte quelques difficultés : - trop forte sensibilité aux fines inertes (ne réagit pas avec la solution, ex silice) pour peu qu'elles soient un peu fines par exemple 4 % de fines siliceuses exemptes d'argiles et inférieure à 20 μm conduisant à un ES voisin de 40.

- piégeage dans le flocculat argileux d'une partie des minéraux inertes fins (calcite, QZ, FLD), ce qui les assimile à des argiles. Ces particules piégées peuvent atteindre jusqu'à 200 µm.

- importance que prend le flocculat avec l'argile la moins nocive qu'est la kaolinite. Or toutes les études sur matériaux composites (bétons) montrent effectivement que l'on peut tolérer 2 à 3 fois plus de kaolinite que d'autres argiles mais plus de kaolinite veut dire aussi une très faible valeur de l'ES ce qui est incompatible avec les spécifications.

- en fin la dispersion des argiles qui augmente avec la teneur en eau est donc souvent avec la durée de stockage non protégé et les diverses manutentions comme le transport. Cela conduit à la formation d'un flocculat plus important piégeant encore plus de fines, c'est la trop fréquente et bien connue : chute de l'ES entre le départ de la carrière et l'arrivée sur chantier. Mais il ne faudrait pas conclure de ces 4 points que l'ES n'a que des défauts, il faut lui reconnaître deux avantages non négligeables : - lorsque la teneur en fines est faible (< 2 %), il est alors très significatif. - un bon ES correspond toujours un bon sable (pour ce qui est des argiles). La limitation de la teneur en fines dans l'essai ES à 10 % pour les assises de chaussées a quelque peu amélioré les défauts 1 et 2 mais les défauts 1, 3 et surtout 4 subsistent toujours et ne peuvent être résolus en partie que par un essai qui ne tiendrait compte que des argiles, ce qui a été mis au point avec l'utilisation du bleu de méthylène.

3.2.5.2 : propreté superficielle des gravillons (NF P.18-591) :

La propreté superficielle des granulats (dont $D > 2$ mm : gravillons et ballasts) est définie comme étant le pourcentage pondéral de particules inférieures à 0,5 mm (ou à 1,6 mm pour les ballasts) mélangées ou adhérentes à la surface des granulats supérieurs à 2 mm.

Les éléments fins contenus dans le granulat à tester sont séparés par lavage sur un tamis d'ouverture 0,5 mm (ou 1,6 mm pour les ballasts), leur pourcentage est déterminé par pesées après séchage du refus

La propreté superficielle est donnée par la formule $P = (m / Ms) * 100$ où **m** : masse sèche des éléments inférieurs à 0,5 mm (ou à 1,6 mm), **Ms** : la masse sèche de l'échantillon soumis à l'essai de propreté.

Les spécifications actuelles exigent pour la plupart des usages, une $P \leq 2$ %.

3.2.5.3 : essai au bleu de méthylène : qualification des fines (EN 933-9) : L'essai consiste à évaluer la qualité des fines contenues dans les fillers (0/0.125) ou dans la fraction 0/2 d'un sable ou d'une grave. Le bleu de méthylène est en effet adsorbé préférentiellement par les argiles de type montmorillonites (argiles gonflantes) et par les matières organiques contenues dans les fines, les autres argiles (Illites et Kaolinites) sont peu sensibles au bleu. L'essai au bleu est un test performant pour qualifier et quantifier de manière simple la propreté des matériaux granulaires (révéler la présence de fines argileuse et d'en déterminer la concentration).

L'essai est effectué en ajoutant successivement des doses d'une solution de bleu de méthylène dans une suspension aqueuse de granulat. L'adsorption de la solution colorée par l'échantillon est vérifiée après chaque addition de solution en effectuant un test à la tache sur du papier filtre pour déceler la présence de colorant libre. Lorsque la présence de colorant libre est confirmée, la valeur de bleu de méthylène (MB pour 0/2 ou MB_F pour 0/0.125) est calculée et exprimée en grammes de colorant adsorbé par kilogramme de la fraction granulaire testée.

Conduite de l'essai : l'essai est conduit sur un échantillon contenant au moins 200 g de fraction granulométrique séchée puis passée au tamis de 2 mm, soit **M₁** sa masse.

-Verser (500 ± 5) ml d'eau distillée ou d'eau déminéralisée dans le bécher et ajouter la prise d'essai (M₁) séchée en remuant bien avec la spatule.

- Mettre en marche l'agitateur au sein du bécher et déclencher le chronomètre :

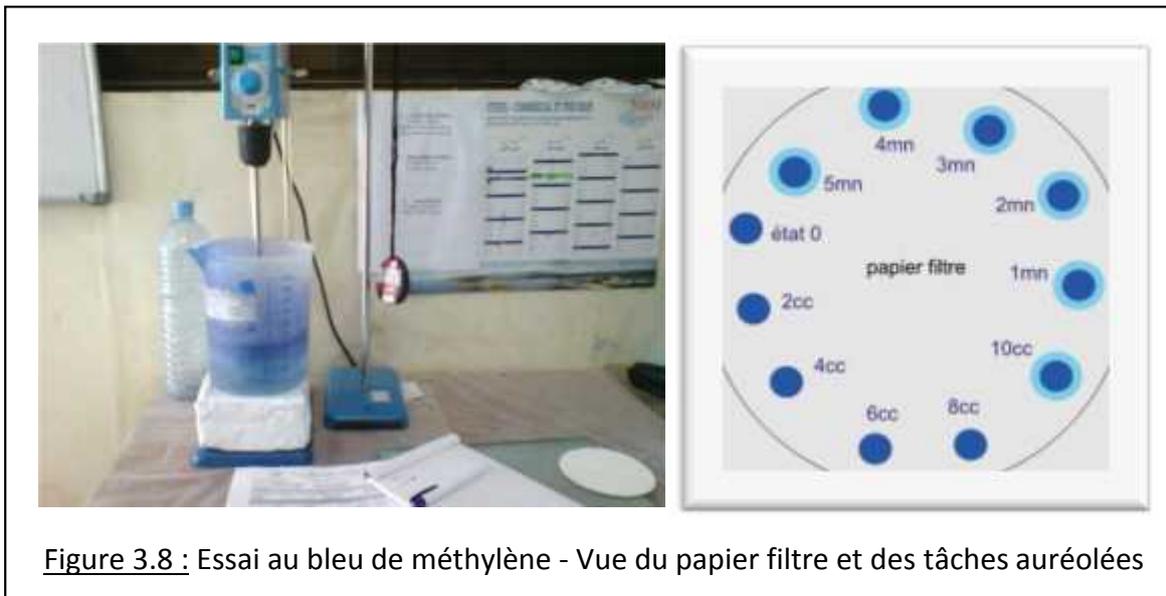
Après une agitation de 5 min à (600 ± 60) tr/min, introduire dans le bécher une dose de 5 ml de solution de colorant, agiter à (400 ± 40) tr/min pendant au moins 1 min et effectuer un test à la tache sur le papier filtre (le test à la tache consiste à prélever à l'aide de la tige de verre une goutte de la suspension et de la déposer sur le papier filtre. La tache qui se forme est composée d'un dépôt central de matériau, en général d'une couleur bleue foncée, entouré d'une zone humide incolore).

Si après l'ajout des premiers 5 ml de solution de colorant l'auréole (zone en bleu clair qui entoure le dépôt central) n'apparaît pas, effectuer une autre addition de 5 ml de solution de colorant, continuer à agiter pendant 1 min, et faire un autre test à la tache. Si aucune auréole n'est visible, continuer à agiter, en alternant les ajouts de colorants et les périodes de mélange jusqu'à apparition d'une auréole. Lorsque ce stade est atteint, continuer à agiter et sans autre ajout de solution de colorant, effectuer des tests à la tache toutes les minutes.

Si l'auréole disparaît durant les quatre premières minutes, ajouter une autre dose de 5 ml de solution de colorant. Si l'auréole disparaît à la cinquième minute, ajouter seulement 2 ml de solution de colorant. Dans tous les cas, continuer l'agitation et les tests à la tache jusqu'à ce qu'une auréole reste visible pendant 5 min (test est positif).

Enregistrer le volume total de solution de colorant, V₁, ajouté pour obtenir une auréole qui est restée visible pendant 5 min. La valeur de bleu de méthylène, MB, exprimée en grammes de colorant par kilogramme de fraction 0/2 mm est obtenue à l'aide de l'équation suivante : **MB = (V₁ / M₁) * 10** où : M₁ est la masse de la prise d'essai, en grammes ; V₁ est le volume total de solution de colorant injectée, en millilitres.

Plus la valeur au bleu est élevée, moins le granulat est propre. Les exigences normatives demandent une V_{ss} de 1.5 % pour les sables et graves et 10 % pour les fillers (MBF).



3.2.6 : Interprétation des résultats : les résultats des essais décrits ci-dessus nous permettent de vérifier la conformité des propriétés des granulats par rapport aux différentes exigences et spécifications en domaine de travaux publics et béton de construction, en se référant à la norme française XP P18-545 et algérienne NA 5043 (en annexe) :

Pour chaque caractéristique, les spécifications peuvent être choisies parmi les codes suivants. Dans ce cas, leur définition doit être reprise explicitement au moins une fois dans les documents de consultation d'entreprise. Sauf indication contraire, l'appartenance à un code nécessite de satisfaire simultanément toutes les conditions de ce code.

A/ Exigences de la granularité et de la forme des gravillons utilisés en couche de fondation, de base et de liaison et en couche de roulement :

Granularité	Code	Couche de fondation, de base et de liaison	Couche de roulement
2D	I	-	Vsi 100
	II	-	
	III	Vsi 100	
	IV	Vsi 100	-
1.4D	I	-	Vsi 98
	II	-	
	III	Vsi 98	
	IV	Vsi 98	-
D	I	-	Ls 99, Li 85, e 10 (±5)
	II	-	
	III	Ls 99, Li 85, e 10 (±5)	
	IV	Ls 99, Li 88, e 10 (±7.5)	-
D/1.4	I	-	Ls 80 ou Ls 70 Li 25 ou Li 20 e 30 (±5)
	II	-	
	III	Ls 80, Li 25, e 30 (±15)	
	IV	Ls 70, Li 20, e 30 (±15)	-
D/2	I	-	-
	II	-	
	III	-	

	IV	Ls 70, Li 20, e 35 (± 17.5)	
d	I	-	Ls 20, Li 00 e 10 (± 5)
	II	-	
	III	Ls 20, Li 0, e 10 (± 5)	
	IV	Ls 20, Li 0, e 15 (± 7.5)	-
d/2	I	-	Vss 5
	II	-	
	III	Vss 5	-
	IV		
Teneur en fines f (0.063)	I	-	Vss 0.5
	II	-	Vss 0.5
	III	Vss 1	Vss 1
	IV	Vss 2	-
FI	I	-	Vss 15
	II	-	Vss 20
	III	Vss 25	Vss 25
	IV	Vss 35	-
SI	I	Vsi 20	Vsi 15
	II	Vsi 40	Vsi 20
	III	Vsi 50	Vsi 25
	IV	-	Vsi 30
CE	I	Vsi 110	Vsi 110
	II	Vsi 105	Vsi 105
	III	Vsi 95	Vsi 95

B/ Exigences de la granularité, de la forme, du VBs et ES des sables et des graves utilisés en couche de fondation, de base et de liaison et en couche de roulement :

Granularité	Code	Couche de fondation, de base et de liaison	Couche de roulement
2D	a	Vsi 100	Vsi 100
	b		-
	c		-
1.4D	a	Vsi 98	Vsi 98
	b		-
	c		-
D	a	Ls 99, Li 85, e 10 (± 5)	Ls 99, Li 85 e 10 (± 5)
	b		-
	c	Ls 99, Li 80, e 10 (± 5)	-
D/2	a	e 20 (± 10)	e 20 (± 10)
	b		-
	c		-
Teneur en fines f (0.063)	a	e 6 (± 3)	e 6 (± 3)
	b		-
	c		-

MB Valeur au bleu de méthylène	a	V _{ss} 1	V _{ss} 1
	b	V _{ss} 1,25	-
	c	V _{ss} 1.5	
SE Equivalent des Sables	a	V _{ss} 60	-
	b	V _{ss} 50	
	c	V _{ss} 40	
CE	a	V _{si} 38	V _{si} 38
	b	V _{si} 35	V _{si} 35
	c	V _{si} 30	V _{si} 30

C/ Exigence de la granularité et masse volumique des fillers et éléments < 0,125 mm des sables ou graves pour enrobés spécifiés dans la norme NF EN 13043 :

Granularité				Masse volumique ρ_f	Porosité rigden ν	MB _F
2 mm	0.125 mm	0.063 mm	Tolérance surface spécifique Blaine			
V _{si} 100	Li 85 e 10	Li 70 e 10	e < 140 m ² /kg	Valeur déclarée	V _{ss} 45 V _{si} 28	V _{si} 10

D/ Exigences des granulats utilisés en bétons de ciment dans les chaussées : Cet article se rapporte la norme NF EN 12620 (granulats pour bétons):

D.1/ Exigences des caractéristiques de fabrication des gravillons : un seul code (III bis) est utilisé :

Granularité (Passants (%) à)									Teneur en fines f	FI
D	D/d	2 D	1,4 D	D	D/1.4	D/2	d	d/2		
D 11.2	4	V _{si} 100	V _{si} 98	L _s 99 Li 80 e 10(±5)		L _s 70 Li 25 e 35 (±17.5)	L _s 20 Li 0 e 10(±5)	V _{ss} 5	V _{ss} 1.5	V _{ss} 20
	4									
D 11.2	2									
	2 D/d 4	V _{ss} 99	L _s 70 Li 25 e 30	L _s 15 Li 0 e 10 (ou Li 0 et L _s 20 et e 10) ⁽¹⁾						
	4	V _{si} 90 (ou Li 80 et L _s 99 et e 10) ⁽¹⁾	L _s 70 Li 25 e 35	L _s 20 et e 10) ⁽¹⁾						

D.2/ Exigences des caractéristiques applicables aux sables et graves : Seules les graves dont D ≤ 6,3 mm sont admises. Pour la suite du texte, les spécifications mentionnées pour les sables s'appliquent également aux graves : un seul code (a bis) est utilisé :

Dimension	Granularité ⁽¹⁾ (Passants (%) à)							Module de finesse ⁽³⁾	SE	MB
	2 D	1,4 D	D	4	1	0.250	0.063			
D 4	Vsi 100	Vsi95	Ls 99 Li 85 e 10	Vss 90 Vsi 50	Vss 60 Vsi 20	Ls 11 e = 6	Ls 10 e = 6 ⁽⁵⁾	e = 0.6	Vsi = 60 ⁽²⁾	Vss 1
4 D 6.3		Vsi 98								

(1) Dans le cas où le passant D est > 99 % la granularité type déclarée est renseignée, au moins, aux dimensions permettant le calcul du module de finesse : 0.125, 0.25, 0.5, 1, 2, 4 mm.
(2) Vsi 55 si Ecs > 30.
(3) Ne s'applique pas aux sables dont D 1 mm.
(4) Si D 2 mm, e 50.
(5) Uniquement pour D = 4 mm.

D.3/ Exigences des caractéristiques applicables aux fillers (voir les normes NF EN 933-9 et 933-10) :

Passant (%) à			MBF
2 mm	0.125 mm	0.063 mm	
Vsi 100	Li 85 e 10	Li 70 e 10	Vss 10

E/ Exigences des granulats utilisés en béton hydraulique : (Bétons de construction)

E.1/ Exigences de la granularité, de la forme et teneur en fines des gravillons :

Granularité (Passants (%) à)									Teneur en fines f	FI	
D	D/d	2 D	1,4 D	D	D/1.4	D/2	d	d/2			
D 11.2	4	Vsi 100	Vsi 98	Ls 99 Li 80 e 15			Ls 20 Li 0 e 15	Vss 5	Vss 1.5 ⁽¹⁾	Vss 20	
	4										
D 11.2	2	Vsi 100	Vsi 98	Vss 99 et Vsi 90 (ou Li 80 et Ls 99 et e 15) ⁽²⁾	Ls 70 Li 25 e 30		Ls 70 Li 25 e 35	Vss 15 Vsi 0 (ou Li 0 et Ls 20 et e 15) ⁽²⁾	Vss 5	Vss 1.5 ⁽¹⁾	Vss 35
	2 D/d 4										
	4										

(1) Vss 4 si MBF 10. (2) Recommandation s'appuyant sur le 4.3.7 de la norme NF EN 12620
Pour l'indice de forme (SI) : il ya 3 codes, SI15, 20 et 40.

E.2/ Exigences de la granularité et teneur en fines des sables et graves : Seules les graves de $D \leq 8$ mm sont admises; les spécifications mentionnées pour les sables s appliquent également aux graves.

Dimension	Granularité ⁽¹⁾ (Passants (%) à)						Teneur en fines $f_{0.063}$ ⁽²⁾		
	2 D	1,4 D	D	4	1	0.250	Code	limites	tolérances
D 4	Vsi 100	Vsi95	Ls 99 Li 85 e 10		e 40	e = 40 ⁽³⁾	fA	Ls 10	e6 ⁽⁴⁾
							fB et fC	Ls 16	
							fD	Ls 22	
D 4	Vsi98		Vss 90 Vsi 50	Vss 60 Vsi 20		fA à fC	Ls 11		
						fD	f déclarée		

(1) Dans le cas où le passant D est $> 99\%$ (cf renvoi c du Tableau 2 de la NF EN 12620) la granularité type, déclaré e dans la FTP, est renseignée, au moins, aux dimensions permettant le calcul du module de finesse : 0.125, 0.25, 0.5, 1, 2 et 4 mm.
(2) Ne s'applique pas aux sables et graves pour mortiers.
(3) e 50 (± 25) si D 2 mm.
(4) e 10 (± 5) si D 2 mm.

E.3/ Exigences de la teneur en fines des sables et graves pour mortiers :

Dimensions	Catégorie EN	Valeur spécifiée
D 4	1	Vss 3
	2	Vss 5
	3	Ls 8 et e6
	4	Ls 30 et e6 ⁽¹⁾
(1) e 10 si D < 2 mm.		

E.4/ Exigences du Module de finesse FM (voir les normes NF EN 12620, Annexe B et NF EN 13139, Annexe A) : Ne s'applique pas aux sables de $D \leq 1$ mm.

Code	Valeurs spécifiées ⁽¹⁾	Tolérances
MFA	Vss = FM type + tolérance (e/2) Vsi = FM type tolérance (e/2)	e 0.6 (± 0.3)
MFB et MFC		e 0.7 (± 0.35)
MFD		e 0.8 (± 0.4)
(1) Les valeurs spécifiées sont déclarées dans la FTP. CF : module de finesse 2.4 4. MF : module de finesse 1.5 2.8. FF : module de finesse 0.6 2.1. GF : module de finesse 2.4 3.6.		

E.5/ Exigences de la propreté des sables et graves (voir les normes NF EN 933-8 et NF EN 933-9) : la conformité des sables et graves est acceptée si les valeurs spécifiées SE ou MB sont respectées :

Code	Sables et graves D > 1 mm		Sables D ≤ 1 mm
	SE	MB	MB
Pa	Vsi 60	Vss 1	Vss 1
Pb et Pc	Vsi 50		Vss 1.25

E.6/ Exigences des caractéristiques applicables aux fillers (voir les normes NF EN 933-9 et NF EN 933-10) :

Code	Granularité (% passant)			MB _F
	2 mm	0.125 mm	0.063 mm	
F4	Vsi 100	Li 85 e 10 (±5)	Li 70 e 10 (±5)	Vss 10

TD N°1 : Compléter les tableaux suivants et tracer les courbes granulométriques, qualifier (en calculant C_c et C_u) le type de granulométrie, calculer le module de finesse du sable, et vérifier les exigences de granularité dans le domaine des techniques routières :

Sable concassé 0/5 (M_t = 1200 gr) :

Tamis (mm)	poids des refus partiels (gr)	poids des refus cumulés (gr)	poids des refus cumulés r %	Pourcentage tamisats cumulés P %
5,00	4,5			
4,00	49,0			
2,50	271,2			
2,00	100,7			
1,25	212,4			
1,00	82,4			
0,63	130,3			
0,500	57,4			
0,315	82,4			
0,25	30,6			
0,20	25,6			
0,125	37,4			
0,080	18,9			
0,063	3,3			

GNT concassée 0/63 pour CDF (Mt = 6615,5 gr) :

Tamis (mm)	poids des refus partiels (gr)	poids des refus cumulés (gr)	poids des refus cumulés r %	Pourcentage tamisâts cumulés p %
100	0,0			
80	0,0			
63	0,0			
50	749,9			
40	558,5			
31,5	479,3			
25	1025,2			
20	561,4			
16	405,3			
12,5	365,7			
8	602,2			
5	486,7			
4	162,5			
2	388,1			
1	261,2			
0,5	161,6			
0,2	126,1			
0,063	73,0			

Matériau drainant 4/63 (Mt = 13473.8 gr) :

Tamis (mm)	poids des refus partiels (gr)	poids des refus cumulés (gr)	poids des refus cumulés r %	Pourcentage tamisât cumulés p %
100	0,0			
80	0,0			
63	0,0			
50	1516,5			
40	697,1			
31,5	2094,4			
25	1851,3			
20	1649,6			
16	1112,6			
12,5	1232,9			
8	1459,0			
5	1250,6			
4	363,3			
2	80,2			
1	18,8			
0,5	14,2			
0,2	18,4			
0,063	20,7			

TD N°2 : Tracer les courbes granulométriques des granulats suivants, déterminer leur type de granulométrie et vérifier les exigences de granularité en domaine du béton hydraulique :

Tamis	Carrière 1 (tamisats cumulés %)				Carrière 2 (tamisats cumulés %)				Carrière 3 (tamisats cumulés %)			
	0/3	3/8	8/15	15/25	0/3	3/8	8/15	15/25	0/3	3/8	8/15	15/25
31.5				100				100				100
25				98				98				100
20			100	50			100	46			100	100
16			99	8			92	4			98	46
14			89	4			65	0			88	6
12.5			73	2			43	0			76	2
10		100	32			100	14			100	6	1
8		79	4			100	3			92	1	0
6.3		33	1			70	1		100	30	0	
5	100	13			100	24			99	3		
3.15	92	1			94	0			90	0		
2	79	0			72	0			65			
1	56				44				41			
0.5	38				28				26			
0.315	34				25				19			
0.2	27				22				13			
0.08	18				19				12			

3.3 : propriétés mécaniques des granulats : les propriétés mécaniques des granulats sont systématiquement déterminées car elles reflètent la dureté et la résistance de ces matériaux aux différents agents de dégradation mécanique (écrasement, choc, usure, polissage...) et effets des conditions climatiques, souvent sévères (mouillage, séchage, gel et dégel...).

Lors de la fabrication du béton, le malaxage est une source de frottement intense entre les grains d'un granulat qui provoque la cassure de ces grains en produisant des éléments fins si le granulat n'est pas assez résistant. De même, une chaussée en exploitation est soumise aux multiples contraintes mécaniques liées aux passages répétés des véhicules, conduisant à émousser, à polir progressivement les granulats et ainsi à diminuer l'adhérence des pneumatiques sur la chaussée. Dans les structures de chaussées, les granulats doivent résister à l'écrasement et aux chocs, et montrer un minimum de dégradation depuis le moment de leur mise en place sous le compacteur jusqu'à la fin de leur période présumée de service. Ils sont exigés d'être résistants à l'abrasion et maintenir une bonne résistance au polissage. En plus ils doivent supporter et diffuser uniformément les contraintes imposées à la couche de roulement, sur la couche de forme efficacement et sans rupture et déformation. Donc les granulats doivent être **résistants** et **durs**.

La résistance mécanique aux différents agents de dégradation et la dureté des granulats sont déterminées par les essais de résistance au choc (Los Angeles LA et Fragmentation Dynamique FD), les essais de résistance à l'attrition (Micro-Deval Humide MDE et Friabilité des Sables FS) et le Coefficient de Polissage Accéléré CPA.

3.3.1/ La résistance à la fragmentation par choc : essai Los Angeles (LA) : NF EN 1097-2

L'essai LA permet de mesurer les résistances combinées à la fragmentation par chocs (due aux boulets) et à l'usure par frottements réciproques des éléments d'un granulat. Il consiste à mesurer la quantité d'éléments inférieurs à 1.6 mm produite par fragmentation en soumettant le matériau à des chocs de boulets d'acier à l'intérieur de la machine LA.

Dans la machine LA (figure 3.9), introduire une masse (M= 5000 gr) lavée et séchée, de granulat de la classe 10/14 (granulat passant au tamis 14mm et retenu au 10mm), et une charge abrasive constituée de onze boulets d'acier (équivalente à 4840 gr), après 500 rotations de la machine à une vitesse régulière de 33 tr/min (pendant 15 minutes), recueillir le granulat et le tamiser à 1.6 mm, peser le refus **m**, le passant au tamis 1.6 mm sera **P** = 5000-m. Par définition, le Coefficient Los Angeles (sans dimension) **LA = (5000-m)/ 50** (ou LA = (P / M) *100).

L'essai peut être aussi réalisé sur les classes granulaires: 4/8 (8 boulets), 6.3/10 (9 boulets), 8/11.2 (10 boulets), 11.2/16 (12 boulets).



Figure 3.9 : Machine pour essai Los Angeles

Un coefficient LA faible correspond à un excellent matériau (résistant à la fragmentation), plus LA est élevé, moins le matériau est dur : LA Quartzite, microgranite et granite finement grenu = 15, LA Silex = 19, LA granite = 20, LA calcaires durs = 20-30, LA calcaires tendres ~ 50-80

Valeurs repères	
Coefficient LA	Appréciation
< 15	Très bon à bon
15 à 25	Bon à moyen
25 à 40	Moyen à faible
> 40	Médiocre

Cet essai est également utilisé pour vérifier la sensibilité au gel des gravillons conformément aux normes NF P18-593 (Décembre 1990) et EN 1367-1 (Avril 2000). Pour NF P18-593, soit M_1 la masse sèche initiale des granulats avant la série de cycles (en grammes), M_2 : la masse sèche finale des granulats retenus sur les tamis et ayant subi 10 cycles de gel-dégel (en grammes), la sensibilité au gel du gravillon (pourcentage de la perte de masse des granulats après les cycles) a pour expression : $F = ((M_1 - M_2) / M_1) * 100$. L'expérience a montré que les granulats ayant un $F \leq 30$ et /ou $LA \leq 25$ sont résistants au gel-dégel.

3.3.2/ La résistance à la fragmentation par impact : essai de fragmentation dynamique (FD) : NF EN 1097-2 : L'essai permet de mesurer la résistance à la fragmentation par impact (due à un marteau tombant) des éléments d'un granulat.

Pour la NF P 18-574 (1990), l'essai consiste à mesurer la quantité d'éléments inférieurs à 1.6 mm produite par fragmentation en soumettant le matériau, placé dans un moule cylindrique en acier, aux chocs (coups répétés) d'une masse de 14 Kg tombante sur l'échantillon (figure3. 10) : Introduire une masse de granulat $M = 350$ gr dans le moule, donner le nombre de coups de masse correspondant à la classe granulaire choisie (pour la classe 10/14, on donne 28 coups, pour 4/6.3 : 16 coups et pour 6.3/10 : 22 coups).

Après essai, recueillir et tamiser le granulat sur le tamis 1.6 mm, peser le refus m , le passant au tamis 1.6mm sera $P = 350 - m$, par définition, le Coefficient $FD = (P / M) * 100$

Pour la norme EN 1097-2 (1998), la valeur de FD équivaut à un cinquième de la somme des pourcentages en masse des échantillons soumis à l'essai passant à travers cinq tamis de contrôle.



Figure 3.10 : Appareil de l'essai **FD**

La classe granulaire comprise entre 8 et 12.5mm (mélange de 8/10 avec 10/11.2 et 11.2/12.5) versée dans le moule de l'appareil est soumise à 10 coups donnés par un marteau tombant d'une hauteur de 370 mm. L'échantillon broyé est ensuite tamiser sur les tamis 0.2 mm, 0.63 mm, 2 mm, 5 mm et 8 mm, on pèse les refus partiels de chaque tamis et on convertit ces masses en pourcentage par rapport à la masse de la prise d'essai, on déduit le pourcentage des masses de passant au cinq tamis. Soit **M** la somme des pourcentages en masse du passant de chacun des cinq tamis, le coefficient **FD = (M/5) %**

Exemple :

Tamis de contrôle	Masse initiale = 1350 gr		
	Masse du refus gr	%	Masse du passant %
8	721.1	53.5	46.5
5	304.5	22.6	23.9
2	181	13.4	10.5
0.63	86	6.4	4.1
0.2	30	2.2	1.9
fond	26	1.9	-
total	1349	100	86.9

$$FD (8/12) = \text{Total du passant} / 5. \quad FD = 86.9\% / 5 = \mathbf{17.38\%}$$

3.3.3/ La résistance à l'usure : essai micro-Deval (MD) : NF EN 1097-1 : L'essai permet de mesurer la résistance à l'usure (ou attrition) par frottements réciproques entre les granulats et une charge abrasive et leur sensibilité à l'eau. Il consiste à mesurer la quantité d'éléments inférieurs à 1.6 mm produite, dans des conditions bien définies, par frottements réciproques des granulats dans un cylindre en rotation (figure 3.11) avec une charge abrasive, à sec ou en présence d'eau (ce qui permet de mettre en évidence la sensibilité des granulats à l'eau et pour se rapprocher des conditions réelles de leur séjour dans les chaussées), le principe est analogue à celui de l'essai LA, avec une charge abrasive plus légère (billes) mais une durée plus longue, il n'y a pas de fragmentation mais seulement une usure : Dans chaque cylindre de la machine, introduire une masse de granulats lavés puis séchés à une masse constante **M** = 500 gr de la classe 10/14 et une charge abrasive constituée de billes en acier équivalente à 5000 gr, ajouter 2.5 litres d'eau (micro-Deval en présence d'eau MDE). Après 12000 tours du cylindre à une vitesse de 100 tr/min pendant 2 heures, tamiser le matériau à 1.6 mm et peser le refus **m**, le passant au tamis 1.6 mm sera **P** = 500-m, par définition, le Coefficient **MDE = (500-m) / 5** (ou **MDE = P/5**).

L'essai peut être réalisé aussi sur les classes granulaires 4/6.3 (avec 2000 gr de charge abrasive), 6.3/10 (avec 4000 gr de charge abrasive), 8/11.2 (avec 4400 gr de charge abrasive) et 11.2/16 (avec 5400 gr de charge abrasive).



Figure 3.11 : Machines micro-Deval composées de deux et quatre cylindres rotatifs

Une valeur plus petite du coefficient MD indique une meilleure résistance à l'usure, ainsi plus le matériau est résistant à l'usure, plus son coefficient MDE est faible : MD Quartzite = 5, MD Granite = 10, MD Calcaires durs = 12-25, MD Calcaires tendres ~ 70.

3.3.4/ La résistance à la fragmentation des sables : essai de friabilité des sables (FS) : NF P18-576 : l'essai consiste à mesurer l'évolution granulométrique d'une fraction de 500 gr de sable (coupure 0.2/2mm ou 0.2/4mm) produite par fragmentation dans un cylindre en rotation (appareil micro-Deval à 100 tr/min pendant 15 min) à l'aide d'une charge abrasive (2500 gr) et en présence d'eau (2.5 litres). L'évolution granulométrique est caractérisée par la quantité d'éléments inférieurs à 0.1 mm produits au cours de l'essai. Si **M** est la masse de la prise d'essai et **m** la masse d'éléments inférieurs à 0.1 mm produits au cours de l'essai, le coefficient de friabilité des sables est **FS = (m/M) * 100** (ou FS = m/5)

Une valeur élevée indique de fortes proportions d'éléments tendres ou friables nuisibles à l'aspect des parements et à la durabilité des bétons, surtout des dallages et des chaussées.

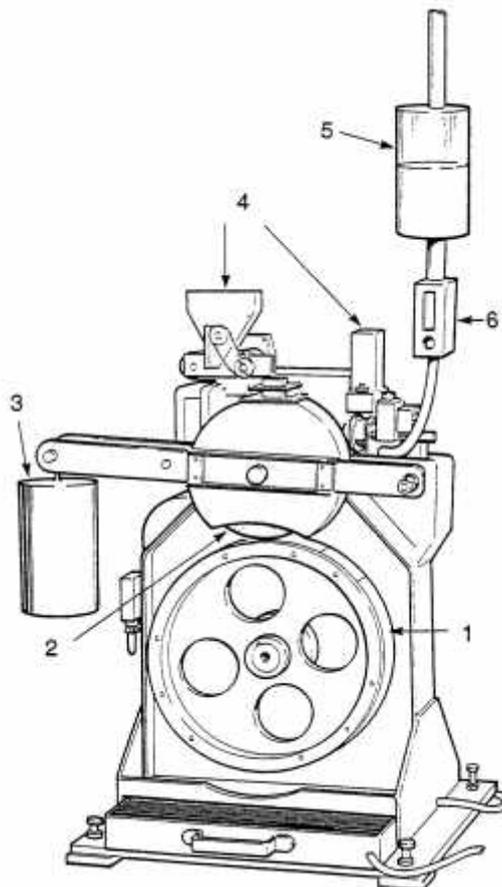
3.3.5/ Coefficient de polissage accéléré (CPA): EN 1097-8 et NA 5010 : Il est possible d'estimer l'aptitude au polissage des roches à partir de leur composition minéralogique, cette aptitude dépend en effet de la résistance à l'usure de la roche liée à la dureté des minéraux et à la différence de dureté entre ses minéraux, différence responsable des aspérités (irrégularités) résiduelles après polissage.

Le CPA est une mesure de la résistance des gravillons et cailloux (utilisés en couche de roulement et en revêtements des routes) à l'action de polissage dû au frottement, exercée par les pneus automobiles dans des conditions similaires à celles qui règnent à la surface d'une route, donc c'est une estimation de la rugosité des couches de roulement. Cet essai, inspiré des anglais, est effectué sur des granulats passants au travers d'un tamis de 10 mm et retenus sur une grille à fentes de 7,2 mm. On confectionne 12 éprouvettes en collant une mosaïque de 36 à 46 gravillons liés entre eux. L'essai se déroule en deux parties :

a) les éprouvettes (éprouvettes à qualifier et éprouvettes de pierres de référence) sont soumises à une action de polissage (test d'usure) dans une machine de polissage accélérée (figure 3.12) : chaque éprouvette est usée sous l'action d'une roue à bandage en caoutchouc avec interposition de deux poudres abrasives constituées de corindon et silicate alumineux, et en présence d'eau. Il se développe un état de polissage résiduel de gravillons.

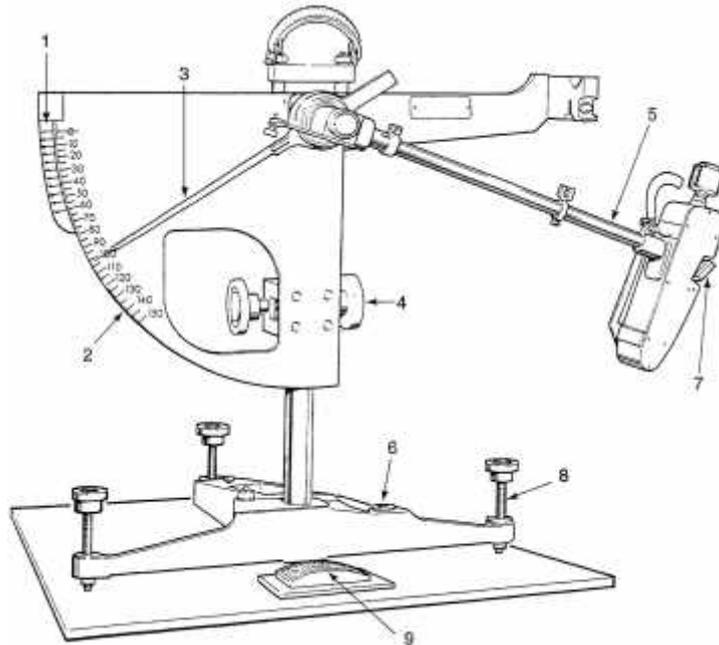
b) les éprouvettes sont sertis (collés) à plat dans un mortier de résine, leur état de polissage est mesuré en procédant à un essai de frottement (mesure de la rugosité résiduelle par pendule de frottement, figure 3.13), le CPA étant ensuite calculé à partir des mesures du frottement.

La résistance au polissage est alors exprimée par un coefficient (ou facteur) appelé **coefficient de polissage accéléré CPA** (polished stone value **PSV**), plus ce coefficient est élevé plus la résistance au polissage est élevée. Le CPA des granulats naturels varie de 0.3 pour les calcaires purs à 0.65 pour les roches silicatées poreuses ou altérées. Il y a souvent contradiction entre la recherche de roches ayant à la fois une résistance mécanique élevée (en général liée à une structure très fine) et un CPA élevé favorisé par une structure grenue et une porosité plus forte.



1 Roue porte-éprouvettes, 2 Roue à bandage plein en caoutchouc avec eau et sable fin, 3 Poids, 4 Mécanismes d'alimentation, 5 Alimentation en eau, 6 Indicateur de débit.

Figure 3.12 : Machine type de polissage accéléré



1 Échelle F, 2 Échelle graduée, 3 Aiguille, 4 Vis d'ajustement vertical, 5 Pendule, 6 Niveau à bulle, 7 Patin en caoutchouc, 8 Vis d'ajustement du niveau, 9 Porte-éprouvette

Figure 3.13 : Pendule de frottement

A titre indicatif, on donne les interprétations de l'essai dans les spécifications françaises :

Interprétation de l'essai CPA des granulats		
CPA	Appréciation	Interprétation
< 35 %	Mauvais	-En principe un tel granulat ne doit pas être employé en couches de surface
Entre 35 et 45%	Passable	-Un tel granulat ne doit pas être utilisé que lorsque les conditions de tracé et de trafic sont favorables (génèrent de faibles frottements)
Entre 45 et 55 %	Bon à	- L'utilisation d'un granulat est recommandée lorsque les conditions de tracé et de trafic sont défavorables et génèrent de frottements importants
> 55 %	très bon	(virages, carrefours, zones de vitesses élevées, ou de trafic intense...)

Les calcaires sont des roches généralement très sensibles au polissage et ceci d'autant plus que leur pâte est plus fine et que leur pureté est plus grande. Le CPA peut descendre pour certains calcaires à 25 %. Par contre une forte teneur en quartz amène certains calcaires gréseux à un CPA de 60 %. La présence de dolomite peut aussi modifier quelque peu les propriétés des calcaires en les améliorant légèrement (CPA des calcaires dolomitique 48 %).

CPA calcaire = 30-40 %, grès et quartzite = 50 %, granite = 55 %, diorite = 48 %, gabbro = 50 %, basalte = 45 %, gneiss = 55 %, amphibolite = 53 %, marbre = 38 %, cornéenne = 52 %.

3.3.5/ Spécifications relatives aux caractéristiques mécaniques des granulats : Dans le cas des bétons utilisés dans la construction des ouvrages d'art et des bâtiments, les problèmes de résistance des granulats ne se posent pas avec la même importance que dans le cas des granulats utilisés dans les techniques routières. Les granulats du premier cas ne subissent généralement pas des chocs et les problèmes de résistance des granulats ne se posent qu'en

fonction des problèmes de manutention et de malaxage. Les essais LA et MDE permettent d'estimer la qualité des granulats utilisés dans la confection des bétons, leurs valeurs sont généralement limitées pour ne pas risquer d'avoir un mélange dont la granularité pourrait évoluer pendant le malaxage ou le transport, ce qui modifierait les propriétés des bétons. On peut de ce fait, recommander des spécifications moins sévères et faciles à satisfaire (bétons exceptionnels LA < 30, bétons de qualité, LA < 40, bétons courants LA < 50).

Néanmoins, une étude pétro-minéralogique plus poussée est nécessaire, car il peut y avoir des minéraux réactifs (siliceux surtout) responsables du phénomène d'Alcali-Réaction des bétons qui consiste en une dégradation du béton avec le temps par l'apparition des fissures qui résultent de réactions entre les particules des granulats (surtout silice amorphe) et les alcalins (hydroxydes de Na et K) de la phase liquide interstitielle du béton.

Pour granulats routiers, les niveaux de spécifications demandés sont plus sévères. En effet, le passage répété de véhicules conduit à émousser, à polir progressivement les granulas et ainsi à diminuer l'adhérence des pneumatiques sur la chaussée, plusieurs facteurs interviennent dans la détermination des niveaux de spécification : - le type de technique où les exigences sont évidemment plus strictes pour les matériaux non traités (GNT des couches de forme) ou à prise lente, que pour ceux où le liant joue son rôle immédiatement (couche de fondation en GC ou couche de base en GB) - la position du granulat dans la chaussée où la surface est soumise à des sollicitations plus fortes- le niveau de trafic où le nombre de poids lourds journalier joue un rôle essentiel (charge utile < 5 t) et enfin - la nature des travaux ou les renforcements sous circulation par exemple ceux qui imposent des conditions plus dures entraînant et de ce fait des spécifications plus sévères.

Dans les assises de chaussées non traitées (couche de forme en GNT), les éléments granulaires ne sont pas liés entre eux et subissent de ce fait, sous les sollicitations répétées de la circulation, une attrition qui intéresse toute la masse de l'assise, ce phénomène est d'autant plus important que la granularité est plus creuse et la compacité est plus faible. Cette attrition produit des sables et des fines et modifie la granularité du matériau. Dans certains cas, les fines peuvent être plastiques, cette évolution se fait toujours au détriment de la stabilité mécanique de l'assise, elle peut également en diminuer la perméabilité.

Dans les assises traitées aux liants hydrocarbonés (couche de base en GB), il existe une liaison souple entre les granulats et l'attrition est beaucoup plus faible que dans les assises non traitées. Avec les liants hydrauliques (couche de fondation en GC), après la prise, les granulats liés entre eux ne se déplacent plus les uns par rapport aux autres, mais pour différentes raisons (dont la principale est le retrait), ces assises se fissurent, ce qui provoque des voies d'introduction de l'eau dans les couches inférieures et il peut en résulter une baisse de portance ou au moins un accroissement de la déformabilité qui se traduit par une fatigue accélérée de toute la structure de la chaussée et une forte attrition des granulats de part et d'autre des fissures. Dans tous les cas, l'attrition est accélérée en présence d'eau.

Les spécifications relatives à la résistance mécanique des granulats pour assises de chaussée portent donc sur coefficient MDE mais aussi sur le coefficient LA pour tenir compte des conditions de mise en œuvre (voir tableau de spécification).

Dans les couches de roulement, les gravillons situés à la surface des chaussées sont soumis à des chocs importants, la roue d'un camion qui circule à 72 km/h est en contact avec un gravillon de 10 mm pendant 1/2000e de seconde. Sous ces chocs répétés, le gravillon peut se fragmenter, cette fragmentation est particulièrement importante dans le cas des pneumatiques équipés de crampons métalliques, elle se produira d'autant plus facilement que le gravillon est moins enchâssé dans le liant, plus protubérant (saillant, clair) à la surface de la chaussée et moins bien fretté par ce liant, ceci explique les spécifications d'autant moins sévères que l'on est en présence de gravillons pour enduits, bétons bitumineux ou bétons hydrauliques (ces considérations expliquent la rigueur particulière des spécifications relatives au coefficient LA pour enduits superficiels des routes à forts trafics).

Le passage répété des véhicules sur des gravillons de surface a une autre action, des glissements se produisent au contact pneumatiques-chaussée en présence d'éléments fins dont certains peuvent être abrasifs, il y a donc usure des gravillons et polissage. Ces phénomènes diminuent le coefficient de frottement de la chaussée et accroissent les risques de dérapage et les distances de freinage des véhicules. Le maintien d'une bonne macrorugosité exige une résistance à l'usure, dont un bon coefficient MDE est voisin de 15, celui d'une bonne microrugosité exige une bonne résistance au polissage donc un coefficient CPA élevé (56). Les gravillons situés à la surface de la chaussée doivent donc avoir un coefficient LA et un coefficient MDE faibles et un CPA élevé (voir les spécifications dans le tableau). On peut cependant admettre une certaine compensation entre ces différents coefficients, dans la limite de 5 unités, il semble que pour les granulats résistants bien à l'usure (MDE très faible), cette limite pourrait être augmentée, le maintien de la macrorugosité comprenant la perte de microrugosité par polissage.

Les exigences des caractéristiques mécaniques décrits par les essais réalisés sur les gravillons ou sur la fraction gravillons des graves, sont résumées dans le tableau suivant (selon la norme française XP P18-545 et algérienne NA 5043). Pour chaque caractéristique, les spécifications peuvent être choisies parmi les codes suivants (A, B, C, D, E), l'appartenance à un code nécessite de satisfaire simultanément toutes les conditions de ce code.

Granulat pour	LA (Vss)					MDE (Vss)					FD Vss			CPA (ou PSV) (Vss)			FS (Vss)	
	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E	A	B	C	A	B	C	A	B
CDF, CDB et CDL	-	20	25	30	40	-	15	20	25	35	18	22	26	-	-	-	-	-
CDR	20		25	-		15		20	-		18	22	26	56	50	-	-	-
Bétons de ciment des chaussées	-	20	25	35	-	-	15	20	25	-	18	22	26	50	-	-	40	60

Bétons hydrauliques	30	40	50	-	-	18	22	26	-	-
Observation	Règle de compensation de 5 points : Un granulats de LA = 25 est jugé conforme au code B s'il possède un MDE 10 (Par exemple, pour le code B des couches CDE, CDB et CDL, LA + MDE = 35 (= 20 + 15). Un granulats de MDE = 20 est jugé conforme au code B s'il possède un LA 15 ; Un granulats de MDE = 18 est jugé conforme au code B s'il possède un LA 17									

D'autres essais peuvent être effectués sur des roches servant à produire des ballasts, des enrochements ou des matériaux de remblaiement et pour couches de forme des routes, pour apprécier les propriétés mécaniques suivantes : abrasivité et broyabilité (NF P 18-579), altérabilité (résistance au gel-dégel NF EN 1367-1 et détermination du retrait au séchage), résistance à la compression uniaxiale (NF P 94-420) ou triaxiale (NF P 94-423) ou essai Franklin (XP P 94-429), résistance à la traction indirecte (essai brésilien NF P 94-422), résistance à l'écrasement (**norme ...**), la dégradabilité (NF P 94-067) et la fragmentabilité (NF P 94-066)..... (**voir cours bouzenoune**)

Abrasivité (NF P 18-579 Décembre 1990) : L'abrasivité est la perte de masse d'une palette d'acier après rotation selon des conditions bien précise, dans un échantillon de granulats jouant le rôle d'une charge abrasive. L'essai permet de mesurer le pouvoir d'abrasion des roches (abrasivité) par rapport à un matériau étalon en acier (capacité d'une roche à provoquer l'usure d'un outil en acier tel que pièce de concasseur, taillant de forage, molette ou pic de machine foreuse...) et de fournir, par l'évolution de la granulométrie de la roche dans l'abrasimètre, une indication sur la résistance de la roche à la fragmentation (broyabilité). Cette propriété est importante pour les travaux d'exploitation des matériaux rocheux, en souterrain comme en ciel ouvert. Elle dépend à la fois de la teneur en minéraux durs (quartz et dolomite notamment) et de la résistance de l'assemblage des grains (cohésion de la roche). Pour estimer l'abrasivité d'un matériau, on peut utiliser l'abrasimètre LCPC, constitué d'un pot.....**p64**

Ajouter une photo de l'essai (voir photos du cours bouzenoune)

Taillant de forage	Longueur frée (m)	
	Roche abrasive	Roche peu abrasive

- **Résistance en compression** (des roches): L'essai mécanique le plus courant est l'essai de **résistance en compression** uniaxiale R_c . Celle-ci est mesurée sur éprouvette cylindrique, de diamètre 40 à 50 mm en général. On fait croître l'effort axial fourni par la presse, avec une vitesse correspondant à environ 0.5 MPa/s, jusqu'à la rupture de l'éprouvette. Si F est l'effort maximal et R le rayon de l'éprouvette, on a : $R_c = F / \pi R^2$.

La résistance en compression simple est une propriété assez dispersée, on réalise en générale cinq écrasement pour obtenir une valeur représentative. Le tableau suivant fourni une échelle de résistance couramment employée. Certaines roches, comme mes calcaires tendres, sont sensiblement moins résistantes à l'état saturé qu'à l'état sec, la perte de résistance peut atteindre 50%.

Classe	Résistance Rc (MPa)	Description
R1	>200	Résistance très élevée
R2	200 à 60	Résistance élevée
R3	60 à 20	Résistance moyenne
R4	20 à 6	Résistance faible
R5	< 6	Résistance très faible

Ajouter une photo de l'appareil et voir la norme (voir photos du cours bouzenoune)

- **Résistance à la traction** (des roches): La résistance à la traction directe est obtenue par traction jusqu'à la rupture d'une éprouvette (de roche) cylindrique dont les extrémités ont été collées sur des têtes métalliques. En moyenne, elle est voisine de $R_c / 10$.

Ajouter une photo de l'appareil et voir la norme (voir photos du cours bouzenoune)

L'**essai de résistance à la traction indirecte**, dit aussi **essai brésilien**, est réalisé en comprimant entre les plateaux de la presse une éprouvette (de roche) cylindrique le long de deux génératrices opposées : la rupture est obtenue par traction au centre de l'éprouvette. On évite ainsi les difficultés de collage des têtes et la dispersion des valeurs est moins grande que dans l'essai direct. Si P est l'effort fourni par la presse au moment de la rupture, R le rayon de l'éprouvette et H sa hauteur, la résistance à la traction indirecte est donnée par : $R_{tb} = P / \pi RH$ en moyenne R_c est égale à $10 R_{tb}$.

Ajouter une photo de l'essai (voir la norme : il y a confusion entre brésilien et franklin)

(voir photos du cours bouzenoune)

- **paramètres de déformabilité** : la mesure des déformations lors d'une compression uniaxiale permet de déterminer les paramètres élastiques de déformabilité de la roche : **module d'Young** (pente de la courbe de déformation longitudinale) et **coefficient de Poisson** (rapport de la déformation transversale à la déformation longitudinale). Le module d'Young est typiquement compris entre 8 et 80 GPa. Le coefficient de Poisson se situe entre 0.1 et 0.4.

Voir aussi le magister de ATOB Souad (voir photos du cours bouzenoune)

-**Résistance aux agents d'altération ou altérabilité** :

.....p64

Ajouter ce paragraphe : un granulat est considéré comme résistant au gel-dégel s'il respecte au moins l'un des critères ci-après :

Absorption d'eau WA24	≤ 0.5 % pour enrochements et ballasts
	≤ 1 % pour autres usages

L'expérience française a montré que les granulats de Los Angeles inférieur ou égal à 25 sont résistants au gel-dégel.

Résistance à l'écrasement NF ...

Essai de fragmentabilité

Essai de dégradabilité

Chapitre 4 : propriétés thermiques et altérabilité des granulats :

4.1 : introduction : Les essais qui permettent la détermination des propriétés thermiques et l'altérabilité des granulats sont donnés par les normes EN 1367 :

Détermination de la résistance au gel-dégel (NF EN 1367-1)

Essai au sulfate de magnésium (NF EN 1367-2)

Essai d'ébullition pour les basaltes coup de soleil (NF EN 1367-3)

Détermination du retrait au séchage (NF EN 1367-4)

Détermination de la résistance au choc thermique (NF EN 1367-5)

Les altérations qui affectent les matériaux composites tel que le béton sont variées, elles atteignent soit la matrice cimentaire soit les armatures et parfois les deux. Ces altérations sont liées à la nature des granulats utilisés (granulats réactifs), soit à la structure (étanchéité, positionnement des armatures : près de surface ...) soit à l'agressivité de l'environnement (proximité de la mer, pollution industrielle ou urbaine...) soit encore au vieillissement des bétons. Indépendamment des problèmes de structure, on parle communément de 5 grands mécanismes de dégradation des bétons : l'alcali-réaction (voir chapitre 5), l'attaque par les chlorures (voir chapitre 5), l'attaque sulfatique (voir chapitre 5), la carbonatation et les cycles de gel-dégel. Les deux derniers mécanismes sont discutés dans ce chapitre.

4.2 : Carbonatation : la carbonatation est un phénomène de vieillissement naturel qui concerne tous les bétons, elle correspond à une transformation progressive d'un des composés du béton durci, la portlandite Ca(OH)_2 en calcite, au contact du dioxyde de carbone (CO_2) contenu dans l'air et en présence d'humidité $\text{Ca(OH)}_2 + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CaCO}_3 + 2\text{H}_2\text{O}$. Cette transformation s'accompagne d'une diminution du P^{H} du béton. Le béton sain a un P^{H} d'environ 13 ce qui constitue un milieu protecteur pour les armatures en acier et permet la formation d'une couche d'oxydes passifs. Une fois le béton s'est carbonaté, son P^{H} devient 9, à ce P^{H} le film passif est détruit et la corrosion peut se développer. Donc une des conséquences principales de la carbonatation est de favoriser la corrosion des armatures (qui se gonflent) lorsque le front de la carbonatation les atteint. Elle se traduit la plupart du temps par l'apparition d'épaufures laissant apparaître des armatures oxydées. Ces épaufures correspondent à un éclatement du béton avec chute de fragments. (Figure 4.1).





4.3 : Cycle de gel-dégel : les dégradations des bétons par cycle de gel-dégel se manifestent sous forme de fissurations internes ou d'écaillages et concernent essentiellement les structures horizontales (ponts, terrasses,...) susceptibles d'être saturées en eau et donc plus sensible à l'action du gel. La gélivité d'un béton peut être occasionnée par une sensibilité au gel à la fois des granulats et de la pâte du ciment.

L'examen pétrographique d'un granulat donne une indication sur la présence d'éléments à faible résistance mécanique et/ou hautement absorbants (poreux) qui peuvent être dégradés par l'action du gel-dégel. La taille des grains et leur porosité joue un rôle sur la gélivité des granulats, les gros granulats à porosité élevée et à pore de dimension moyenne (0.1 à 0.5 μm) plutôt que les fins qui se saturent facilement et provoquent la détérioration et l'écaillage du béton. Les gros pores ne se saturent habituellement pas et ne causent pas de contraintes dans le béton. La transformation de l'eau en glace s'accompagne d'une augmentation de volume d'environ 9%, cette expansion de volume est souvent la cause principale de la création de certaines fissures dans la pâte du ciment.

Lorsque la présence de grain poreux et de taille moyenne est constatée ou suspectée, l'un des essais suivants peut être utilisé pour évaluer la sensibilité au gel-dégel d'un granulat :

- essai d'absorption d'eau : lorsque le coefficient d'absorption d'eau du granulat WA_{24} est inférieur à 2%, le granulat peut être considéré comme résistant à l'action du gel-dégel.
- essai de résistance au gel-dégel (NF EN 1367-1) : un granulat est considéré comme non gélif si F est inférieur à 30 et LA est inférieur à 25.
- essai de détermination du retrait au séchage (NF EN 1367-4) : le retrait au séchage des bétons après 3 jours ne doit pas être supérieur à 0.075 % (**norme ?**).

4.3.1 : Détermination de la résistance au gel-dégel (NF EN 1367-1) : Les résultats de cet essai permettent une évaluation de la résistance du granulat à cette forme d'altération.

L'essai est applicable aux granulats d'une granularité comprise entre 4 mm et 63 mm (La classe granulaire recommandée est de 8 mm à 16 mm).

Principe : Après avoir été imbibées d'eau à la pression atmosphérique pendant 24 heures, les éprouvettes appartenant à une seule classe granulaire sont soumises à 10 cycles de gel-dégel, chaque cycle comportant un refroidissement à $-17,5$ °C sous l'eau puis un dégel dans l'eau à une température de 20 °C. À la fin des dix cycles, on examine les granulats pour rechercher d'éventuels changements (formations de fissures, perte de masse et, le cas échéant, modification de résistance). Chaque cycle de gel-dégel doit être achevé dans un délai de 24 h : Les granulats à tester doivent être lavés pour éliminer les particules adhérentes, ensuite ils sont séchés à masse constante à (110 ± 5) °C, puis refroidis à température ambiante et pesés immédiatement (M_1). À la fin du dixième cycle, verser les granulats dans un tamis d'essai dont les mailles sont deux fois plus petites que celles du plus petit diamètre du granulat (par exemple, dans le cas d'une classe granulaire 8/16 mm, utiliser un tamis de 4 mm). Laver et tamiser à la main les granulats sur le tamis spécifié (4 mm). Sécher le refus à (110 ± 5) °C jusqu'à masse constante, refroidir à température ambiante et peser immédiatement (M_2). Calculer le passant à partir des résidus des granulats trois éprouvettes, peser et exprimer la masse ainsi obtenue en tant que pourcentage de la masse de ces granulats. Calculer le résultat de l'essai de gel-dégel (F) à l'aide de la formule suivante : $F = ((M_1 - M_2) / M_1) * 100$ où M_1 : la masse sèche initiale des granulats avant la série de cycles, en grammes; M_2 : la masse sèche finale des granulats qui sont retenus sur les tamis, en grammes; F est le pourcentage de la perte de masse des granulats après les cycles.

4.3.2 : Détermination du retrait au séchage (NF EN 1367-4) : cette norme décrit une méthode pour déterminer l'influence des granulats (passants à 20 mm) sur le retrait ou séchage des bétons. Principe : Les granulats soumis à l'essai sont mélangés à du ciment et de l'eau et coulés en prismes (éprouvette prismatiques) de dimensions spécifiées. Les prismes sont mis dans l'eau puis séchés à 110 °C. La variation de la longueur de l'état humide à sec est mesurée. Le retrait au séchage des granulats correspond à la variation moyenne de la longueur des prismes en pourcentage de leur longueur finale à sec.

Mode opératoire : dans les 40 h qui suivent le compactage des prismes, immerger ces derniers dans de l'eau à une température de 20 ° C pendant 120 h. Sortir les prismes, mesurer la longueur de chaque prisme et noter les différences de longueur (w) entre chaque prisme et la barre de référence. Placer les prismes dans l'étuve à une température de 110 ° C. S'assurer que l'air circule librement tout autour des prismes. Après 72 h, enlever les prismes du four et les laisser refroidir dans le dessiccateur pendant 24 h. Mesurer la longueur et noter la différence de longueur (d) entre chaque prisme et la barre de référence. Après que les mesures à sec aient été effectuées, mesurer la longueur (l) du prisme à côté des billes, plots hémisphériques ou inserts arrondie au millimètre et noter cette longueur du prisme sec. Calculer le retrait au séchage (S) pour chaque prisme en pourcentage avec la formule :

$S = ((w - d) / l) * 100$ où : w est la mesure initiale (humide), en millimètres ; d est la mesure sèche, en millimètres ; l est la longueur du prisme sec, en millimètres.

Chapitre 5 : propriétés chimiques des granulats et réactivité aux alcalis

5.1 / analyse chimiques sur granulats : Les essais permettant de déterminer les propriétés chimiques des granulats sont décrits dans les normes EN 1744.

En plus de la détermination de la solubilité (dans l'eau et dans l'acide) et de la perte au feu des granulats, l'analyse chimique consiste au calcul des pourcentages des composés chimiques nocifs suivants :

- **chlorures solubles dans l'eau :** les chlorures peuvent être présents dans les granulats généralement sous forme de sels de sodium NaCl et de potassium KCl. Ils peuvent être aussi contenus dans l'eau de gâchage, dans les adjuvants du béton ou encore dispersés dans l'environnement (proximité de la mer, sels de déverglaçage...). De tels sels influent sur la teneur totale en chlorures et alcalins du béton et conduisent à une dépassement (privation) et à une grande sensibilité à la corrosion des armatures incorporées dans les bétons. Pour réduire le risque de corrosion, la valeur limite de la teneur en ions chlorure ne doit pas dépasser les 0.01 % (EN 12620 et NA 5043).

Principe de l'essai (méthode de Volhard) : L'essai des chlorures solubles dans l'eau convient aux granulats dont la teneur en chlorures provient d'un contact direct avec des eaux salines, ou d'une immersion dans des eaux salines, par exemple cas typique des granulats dragués en mer. Une prise d'essai d'un granulats est traitée à l'eau pour en extraire les ions chlore. La méthode d'analyse du soluté est basée sur le titrage de Volhard, où l'on ajoute à la solution contenant les chlorures un excès d'une solution de nitrate d'argent AgNO_3 ; la quantité n'ayant pas réagi est titrée en retour par une solution étalon de thiocyanate NH_4SCN , en employant une solution de sulfate d'ammonium et de fer comme indicateur. Les chlorures sont exprimés et rapportés en teneur en ion chlore en pourcentage massique du granulats.

- **sulfates solubles dans l'eau** (gypse $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, H_2SO_4 ...) : les sulfates peuvent provenir des granulats ou de la pollution industrielle et urbaine dans l'environnement sous forme liquide ou gazeuse. En présence d'eau et du CO_2 , ces minéraux sulfatés (absorbants et fort solubles dans l'eau) peuvent réagir avec certains composés du béton (notamment les aluminates et les carbonates) pour produire des sels de l'étringite (sulfate de calcium et d'aluminium hydraté $\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12} \cdot 26\text{H}_2\text{O}$) ou de la thaumasite ($\text{Ca}_3\text{Si}(\text{CO}_3)(\text{SO}_4)(\text{OH})_6 \cdot 12(\text{H}_2\text{O})$), ces sels à caractère expansif engendrent des ruptures du béton par gonflement et fissuration. Les fissures produites sont généralement assez fines et surtout organisées en un réseau de mailles appelé faïençage (figure 5.1).

Dans certaines conditions, quelques composés soufrés présents dans les granulats peuvent s'oxyder dans le béton et produire des sulfates. La teneur en sulfates des granulats ne doit pas dépasser 0.2 % en masse (EN 12620).

Principe : Une prise d'essai d'un granulats est extraite à l'eau pour en retirer les ions sulfate solubles à l'eau. La teneur en sulfate soluble à l'eau est déterminée par précipitation, à pH compris entre 1 et 1,5, par une solution de chlorure de baryum $\text{BaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ à ébullition. Le dosage est ensuite achevé par gravimétrie et la teneur en ion sulfate est exprimée en pourcentage en masse du granulats.



Figure 5.1 : attaque sulfatique produisant un faïençage des fissures dans les bétons et routes

- **soufre total** (S, SO₂, FeS...): **chercher ses influences** la teneur totale en soufre des granulats ne doit pas dépasser 1 % en masse. Il faut prendre des précautions particulières lorsque la pyrrhotite, forme instable de sulfure de fer (FeS), est présente dans le granulat. Si la présence de ce minéral est avérée, il convient de réduire la teneur totale en soufre à 0.1 % maximum (EN 12620).

Principe : Une prise d'essai de granulat est traitée au brome et à l'acide nitrique pour oxyder en sulfates tous les composés du soufre présent; les sulfates sont précipités et pesés sous forme de BaSO₄. La teneur en soufre est exprimée en pourcentage en masse du granulat

- **sulfures (CS₂, H₂S, FeS₂)** : **chercher ses influences** : Notamment la pyrite FeS₂ (sulfure de fer) dont l'oxydation peut engendrer la modification du P^H du milieu et dont les répercussions peuvent être des désordres géotechniques aux ouvrages du fait de gonflements dus à la création de nouvelles espèces minérales (de type sulfate : la thaumasite). Il existe d'ailleurs des spécifications sur le dosage maximum admissible pour ces matériaux *réactifs*.

- **composés organiques (teneur en matière humique)** : les matières humiques affectent les bétons en augmentant le temps de prise et du durcissement et en réduisant la résistance à la compression des ciments et bétons, la proportion des impuretés organiques légères ne doit pas dépasser 0.5 % en masse pour les sables ou 0.1 % en masse pour les gravillons (EN

12620 et NA 5043). Les matières humiques développent une couleur sombre par réaction avec NaOH (hydroxyde de sodium) à 3 %. L'intensité de la couleur dépend de la teneur en matières humiques. Si la solution n'est pas ou peu colorée, le granulat ne contient pas de quantités considérables de matières humiques.

- **solubilité dans l'eau des granulats** : La prise d'essai du granulat est extraite avec deux fois sa propre masse d'eau. Après extraction, le granulat récupéré est séché et pesé.

Préparation de la prise d'essai : Passer 15 kg de granulat au travers d'un tamis de 16 mm et concasser tout refus de manière à le faire traverser le tamis, en évitant un broyage excessif. Rassembler, mélanger intimement et préparer deux prises d'essai d'environ chacune 2 kg de masse pour les gravillons, ou deux prises d'essai d'environ chacune 500 g pour les sables. Peser la prise d'essai sèche à 1 g près (m_1).

Extraction des constituants solubles : Pour les gros granulats, utiliser deux bouteilles à extraction en plastique ou en métal de 5 l de capacité à col large, munies de bouchons hermétiques, et pour les granulats fins, employer deux bouteilles de 2 l de capacité. Ajouter à chaque bouteille une masse d'eau déminéralisée égale au double de la masse de la prise d'essai. Fixer les fermetures étanches des bouteilles et mélanger leur contenu au moyen de l'agitateur à secousses ou à rouleaux, en continu pendant 24 h minimum. Après 24 h d'extraction, laisser décanter la majeure partie du solide. Éliminer une quantité maximum de liquide surnageant par filtration sur papier-filtre de texture moyenne, Transférer quantitativement le granulat décanté, à l'aide d'une quantité minimum d'eau, dans une assiette (capsule) d'évaporation en porcelaine. Ajouter le papier-filtre et les particules retenues au contenu de la capsule. Sécher pendant 24 h à température de 110°C et refroidir. Peser à 0,1 g près et calculer la masse du granulat en soustrayant les masses de la capsule et du papier-filtre (m_2).

Calcul et expression des résultats : Calculer la solubilité WS dans l'eau du granulat à partir de l'équation suivante : $WS \text{ (en \%)} = ((m_1 - m_2) / m_1) * 100$ où : m_1 est la masse du granulat avant extraction, en grammes; m_2 est la masse du granulat après extraction, en grammes.

- **perte au feu** : Principe : La perte au feu est déterminée en atmosphère oxydante (air). Par chauffage à l'air à 975° C, l'anhydride carbonique ainsi que l'eau non évaporée pendant le séchage, sont expulsés, de même que tous les éléments oxydables volatils présents. Peser la prise d'essai à 0,1 mg (m_1) près, dans un creuset (verre en porcelaine) calciné, capable de conserver une masse constante lors d'un chauffage à 1 100 °C). Placer le creuset dans le four électrique réglé à (975° C. Laisser le creuset au four pendant au moins 60 min. Refroidir le creuset dans un dessiccateur jusqu'à température du local et peser à nouveau (m_2). NOTE : Dans le cas des granulats calcaires, le chauffage jusqu'à 975 °C doit être exécuté lentement, de manière à minimiser le risque de violentes projections.

Calculer la perte au feu du granulat à partir de l'équation suivante : $\text{perte au feu (en \%)} = ((m_1 - m_2) / m_1) * 100$ où : m_1 est la masse de la prise d'essai, en grammes; m_2 est la masse de la prise d'essai calcinée, en grammes.

5.2 : qualification de la réactivité des granulats aux alcalis ou l'alcali-réaction :

5.2.1 : Définition : Selon les normes FD P 18-542 (Mai 1994) et XP P 18-594 (Février 2004), on désigne par alcali-réaction des granulats (ARG) un ensemble de réactions chimiques entre certaines formes de silice, de silicates ou de carbonates, pouvant être présentes dans les granulats, et les ions hydroxydes (OH^-) associés aux alcalins (Na^+ , K^+) présents dans la solution interstitielle du béton (pâte du ciment). Les éléments alcalins peuvent provenir du ciment utilisé, de l'eau de gâchage, des adjuvants et additions minérales et même des granulats composants le béton, ils peuvent être aussi provenir de l'extérieur (eaux salines et sels fondants).

L'alcali-réaction correspond donc à des réactions d'attaque du granulat par le milieu basique (alcalin) du béton. Sous certaines conditions (notamment en présence d'eau) et en l'absence de précautions particulières, ces réactions provoquent la formation d'un gel hydrophile (silico-alcalin), dont l'expansion engendre, des gonflements caractéristiques conduisant à des fissurations importantes dans les bétons (figure 5.2), et par conséquent une diminution de ces propriétés mécaniques : résistance à la compression, à la flexion, modification du module d'Young.

Le développement des phénomènes d'alcali-réaction dans les bétons nécessite la conjugaison de trois principaux facteurs : - une teneur élevée en alcalins ou en ions OH^- dans la phase liquide interstitielle du béton, - la présence de minéraux réactifs dans les granulats (ex : silice amorphe, dolomite...), - de l'eau ou un environnement humide pour permettre le transport et la réaction des ions et des substances dissoutes réactives.

Le premier facteur nécessite la connaissance du processus des réactions et du rôle des ciments. La connaissance du deuxième facteur est essentielle dans la démarche préventive que tout projeteur doit effectuer lors de l'étude de l'ouvrage, le troisième facteur, lié à l'environnement de l'ouvrage, peut dans une certaine limite être maîtrisé par l'adoption de dispositions constructives.



5.2.2 : Facteurs de l'alcali réaction : en présence de milieu humide, l'importance du phénomène d'alcali réaction et le caractère endommageant des produits formés (gel expansif) dépendent de plusieurs facteurs :

A/ Facteurs liés à la minéralogie : Les minéraux réactifs comme les silices amorphes ou cryptocristallines (l'opale, la calcédoine, la cristobalite, les verres siliceux, les quartz microfissurés et les quartz de recristallisation) sont les facteurs principaux qui interviennent dans les réactions, Ils sont facilement identifiables au moyen de l'analyse chimique et pétrographique. On les rencontre dans les roches et alluvions siliceuses, dans les roches et alluvions silicatées polyphasées et dans les carbonatées (sous forme d'inclusion). Le tableau suivant donne les principales roches pouvant contenir des minéraux sensibles en milieu alcalin.

	Roches	Minéraux sensibles en milieu alcalin
Roches magmatiques	Granites, Granodiorites	Quartz à réseau déformé, présentant une extinction ondulante. Minéraux feldspathiques altérés, joints de grains ouverts
	Rhyolites, Dacites, Andésites, Trachyandésites, Basaltes	Présence de verres siliceux ou de verres basaltiques plus ou moins dévitrifiés. Présence de tridymite, de cristobalite, d'opale
	Obsidienne, Tufs volcaniques, Rétinites	Verres riches en silice plus ou moins dévitrifiés, souvent microfissurés
Roches métamorphiques	Gneiss, Micaschistes	Quartz à extinction ondulante. Micro quartz de seconde génération. Joints de grains ouverts, minéraux feldspathiques et micacés altérés
	Quartzites, Cornéennes	Quartz associés à un ciment quartzeux et opalin. Présence de micro quartz de seconde génération. Présence de phyllosilicates. Présence de quartz à extinction ondulante ou de quartz microfissurés
Roches sédimentaires	Grès, Quartzites	Ciment siliceux mal cristallisé, joints de grains élargis
	Grauwackes, Siltites, Schistes quartzeux	Minéraux phylliteux associés. Présence d'opale, de quartz microcristallins
	Chailles, Silex	Présence de calcédoine, d'opale
	Calcaires, Calcaires dolomitiques, Dolomies	Présence de silice de type opale en micronodules ou diffuse en réseau, associée ou non à des sulfures sédimentaires et des phyllites

L'identification de ces roches n'est pas suffisante pour permettre de caractériser un granulats comme réactif. Cette première approche, absolument nécessaire, permet tout au plus d'alerter sur l'existence ou non d'un risque potentiel de réactivité. Dans l'affirmative, ce sont les essais de laboratoire (rapides et à long terme) sur éprouvettes de mortier ou béton qui permettent la vérification de la réactivité des granulats.

B/ Facteurs liés à la structure et texture : la silice réagit de façon différente selon son état (cristallin ou amorphe), sa surface spécifique et les déformations ou les défauts qui peuvent affecter son réseau. Ces facteurs peuvent être appréciés ou mesurés. Ainsi la diffractométrie des rayons X autorise la détermination de l'état cristallin et précise le type de structure. La microscopie optique polarisante reconnaît les défauts ou déformations du réseau ainsi que la microfissuration qui affecte plus ou moins les grains, elle permet aussi la reconnaissance des microquartz de recristallisation.

C/ Facteurs liés à la composition du fluide interstitiel : la composition de la solution interstitielle dépend de la nature du ciment, des granulats, des adjuvants et de l'eau. Tous ces composants vont influencer sur le P^H et la concentration en alcalins, ces paramètres jouant à leur tour un rôle déterminant sur la silice dissoute. Les études montrent que la formation du gel expansif est conditionnée par l'existence dans le milieu de rapports de concentration silice/alcalins (SiO_2/Na_2O) déterminés, en dehors de ces rapports, il ne se forme pas de gel. Les recommandations demandent que la teneur en alcalins du béton soit inférieure à 3 Kg/m^3 et que la teneur maximale soit limitée à 3.3 Kg/m^3 .

5.2.3 : Types d'alcali-réaction : par ordre de fréquence et d'importance des désordres entraînés par la réaction, et selon la nature pétrographique du minéral réactif présent dans le granulats, on distingue 3 types de réaction :

A/ Les Réactions Alcali-silice : ce sont des réactions entre les molécules de silice contenues dans le granulats et les ions hydroxydes (OH^-) associés avec les ions de sodium (Na^+) et de potassium (K^+) dissous dans la solution interstitielle. Le produit de la réaction est un gel de silice qui est expansif en présence d'humidité en provoquant des fissures dans le granulats et la pâte du ciment.

Presque toutes les roches contiennent un peu de silice, exception faite de quelques calcaires purs et dolomite ($CaMg(CO_3)_2$). La réaction est d'autant plus rapide et plus intense lorsque la forme de la silice est plus soluble. La silice amorphe ou mal cristallisée est la plus réactive. Le classement ci-après donne la liste dans l'ordre de décroissance de la réactivité des différentes variétés naturelle de silice et de roche susceptibles de contenir de la silice. L'ordre de réactivité est aussi fonction du degré de désordre cristallin susceptible d'affecter ces différentes variétés.

L'expansion dans ces bétons réactifs est produite par les matériaux contenant de la silice la plus amorphe (mal cristallisée) et dissoute dans la solution interstitielle hautement alcaline de la pâte, qui en se solidifiant, produit un gel expansif dans les particules siliceuses. Avec l'expansion le gel migre en dehors de la particule et peut pénétrer la pâte et se rassembler dans les vides piégés, les pores et les microfissures. Les gels formés à la surface des particules de granulats avant le durcissement sont riches en chaux. Une fois les réactions alcali-silice apparaissent dans les bétons, elles continueraient jusqu'à la détérioration complète du béton tant que les ions alcalins nuisibles, les granulats réactifs et l'eau sont disponibles. Cette réaction peut être évitée par le choix approprié de granulats propre non réactif, l'utilisation du ciment à faible teneur en alcalins et éventuellement par des ajouts de pouzzolanes.

Ordre de décroissance de la réactivité des différentes variétés de la silice	Ordre de décroissance de la réactivité des roches susceptibles de contenir de la silice
<ul style="list-style-type: none"> - Silice amorphe dans les verres volcaniques « obsidiennes) - opale - silice cristallisée instable tel que la tridymite et la cristobalite - calcédoine - autres formes cryptocristallines de silice - quartz métamorphique (grenu, déformé ou stressé) - quartz mal cristallisé 	<ul style="list-style-type: none"> - Verres volcaniques riche en silice et roche pyroclastiques de composition rhyolitique par exemple - grès métamorphisés (quartzites) - chert (chaille) - grewack - granites et gneiss déformés - schistes, phyllites et argilites riche en quartz et micas (shales métamorphisées)

B/ Les Réactions Alkali-silicate : La réaction alcali-silicate survient lorsque les agrégats du béton sont contaminés par la présence de minéraux phylliteux (argiles, micas altérés...) ou minéraux feldspathiques altérés.

C/ Les Réactions Alkali-Carbonate : ce sont des réactions entre les particules carbonatées (essentiellement calcaro-dolomitiques) des granulats et les ions hydroxydes associés aux alcalins dans la pâte du ciment, produisant un produit expansible qui entraîne des ruptures dans le béton. La présence de dolomite ou de magnésite dans les granulats peut engendrer une réaction entre le carbonate de magnésium et la chaux qui donne lieu à la cristallisation de brucite, un hydroxyde de magnésium dont le gonflement différé peut endommager le béton : $MgCO_3 + Ca(OH)_2 \rightarrow CaCO_3 + Mg(OH)_2$.

La description des granulats carbonatés réactifs vis-à-vis la réaction alcali-carbonate a montré qu'il s'agit de calcaires dolomitiques impurs constitués de proportions de similaires calcite et de dolomite (75-90% de la masse de la roche) et de 10 à 25 % de minéraux non carbonatés insolubles à l'HCL dilué (quartz ou silice totale (SiO₂) inférieure à 4 %, minéraux argileux et pyrite ou autres sulfures de fer). Le granulat calcaro-dolomitique réactif est riche en impuretés argileuses (> 10 %), sa couleur est souvent gris foncé ou presque noir typique, due à la présence de disséminations de sulfures de fer, les grains sont submicroscopiques (fins) le plus souvent enchevêtrés induisant à des ruptures subconcoïdales.

La microtexture des particules granulaires constitue la caractéristique la plus facilement identifiable au microscope des roches susceptibles de développer des réactions alcali-carbonate, cette microtexture est caractérisée par la présence de petit cristaux rhombiques de dolomite dispersés dans de la calcite ou par une matrice de micrite contenant des constituants fins, particuliers et insolubles, cette microtexture peut être aussi confinée à certaines fissures et zones de remplissage.

5.2.4 : Pathologie et manifestations externes : En général, les désordres apparaissent à des échéances variables de deux à dix ans ou plus, sur les bétons en contact permanent avec l'eau : barrage et bassin d'eau, pont, stations d'épuration, réservoirs et châteaux d'eau.... Les réactions le plus fréquentes sont les réactions alcali-silice, les principaux désordres se signalent par un ou plusieurs des symptômes suivants (figure 5.3-5.6) :

- une fissuration en réseau et un faïençage à mailles plus ou moins larges ou en étoile
- une fissuration orientée suivant une direction fonction de la distribution des armatures,
- Autres manifestations : des exsudations blanches formées de calcite et parfois de gels translucides, des pustules (petits soulèvements) ou cratères avec des éclatements localisés en forme de petits cônes résultant de la réaction de gros granulats superficiels qui sont visibles au fond des cratères d'éclatement, des mouvements et déformations, et enfin des colorations ou décolorations.

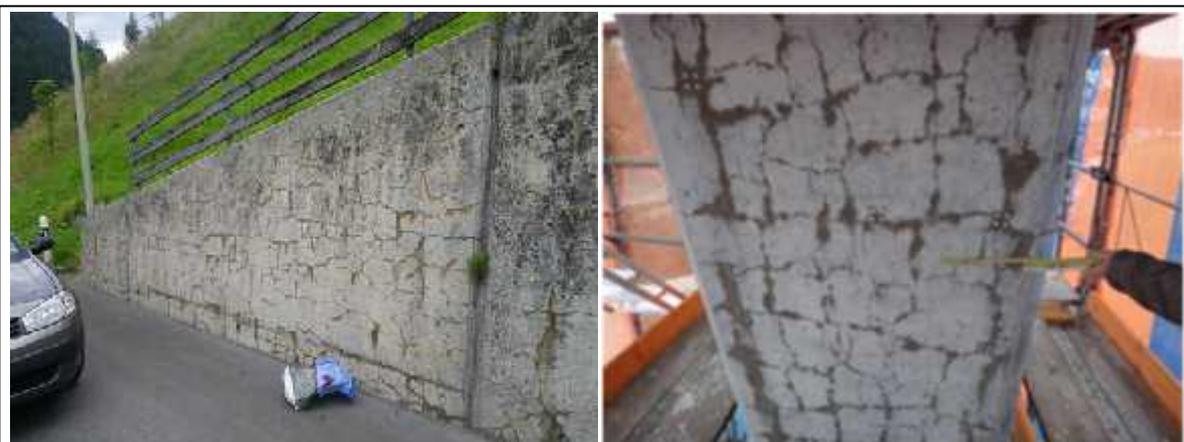


Figure 5.3 : fissuration en réseau et faïençage des bétons dus à l'alcali-réaction



Figure 5.4 : fissuration orientée reproduisant le tracé des armatures dans le béton



Figure 5.5 : coloration et décoloration des bétons le long e fissures



Figure 5.6 : exsudations blanches ou grisâtres au droit des fissures

5.2.5 : Prévention et qualification de granulats vis-à-vis de l'alcali-réaction : Selon les normes FD P 18-542 (Mai 1994) et XP P 18-594 (Février 2004), la prévention des désordres dus à l'alcali-réaction nécessite que les granulats soient qualifiés soit comme :

- «non réactifs NR » : granulats pour bétons hydrauliques qui, quelles que soient leurs conditions d'utilisation, ne conduiront pas à des désordres (gonflements) par alcali-réaction (lorsque l'essai de qualification des gonflements éventuels qu'ils génèrent restent inférieurs au seuil fixé pour l'essai réalisé).

- soit comme «potentiellement réactifs PR » : granulats susceptibles, dans certaines conditions, de conduire à des désordres par alcali-réaction : les gonflements générés des bétons dépassent le seuil de réactivité fixé pour l'essai de qualification mis en œuvre. Les granulats peuvent en général être utilisés dans les bétons, sous réserve du respect des précautions particulières et prescriptions définies dans des «Recommandations pour la prévention des désordres dus à l'alcali-réaction : Publication LCPC - Direction des Routes - 1994 ».

- soit comme «potentiellement réactifs à effet de pessimum PRP » : Pour les granulats renfermant des espèces minérales siliceuses très réactives (opale : silice amorphe, ou tridymite ou cristobalite, calcédoine, quartz amorphe) facilement solubles en milieu alcalin, le risque d'expansion (gonflement des bétons) n'existe que lorsque ces espèces sont en proportions voisines d'une certaine plage de valeurs critiques dites pessimales (le Pessimum étant le pourcentage de silice réactive ou de granulat réactif, qui correspond au maximum d'expansion). Ce phénomène étant lié à des notions de cinétiques de réactions et de rapport $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ des solutions interstitielles. Ces granulats qui, bien que riches en silice réactive, peuvent être mis en œuvre sans risque de désordres si leur utilisation satisfait aux conditions décrites dans le document «Recommandations pour la prévention des désordres dus à l'alcali-réaction : Publication LCPC - Direction des Routes - 1994 ».

La démarche de qualification des granulats vis-à-vis de l'alcali-réaction impose d'identifier le type de granulats auquel on a à faire et les espèces réactives qui y sont contenues. Cela implique, d'une part la recherche d'espèces minérales réactives par une identification pétrographique du granulat au sens large et d'autre part par la vérification de la potentialité de réactivité qui implique des essais rapides et à long terme sur éprouvettes de mortier ou béton. Pour conduire cette démarche, il est obligatoirement nécessaire de procéder, dans l'ordre, à :

I : Une identification des espèces minérales présentes, avec si possible une évaluation quantitative des espèces réactives ou potentiellement réactives par des analyses physico-chimiques élémentaires, examens minéralogiques (lithologique) ou pétrographiques (sur lame mince). Ces techniques sont complétées si besoin, par des méthodes telles que : spectrographie IR (infrarouge); diffraction des rayons X; examen au microscope électronique à balayage de surfaces polies après attaque.

Une roche ou un granulat est considéré comme non réactif, si l'un des critères quantitatifs suivants est satisfait :

- Cas général : L'analyse ne révèle pas d'espèces minérales réactives (silice amorphe (opale, calcédoine), tridymite ou cristobalite, quartz amorphe ou métamorphisé) en proportions supérieures à 2 %.

- Cas des roches carbonatées : Soit teneur en silice totale (SiO_2) inférieure à 4 % (et aucune concrétion siliceuse (silex, chailles) n'est identifiée dans le gisement), soit différence entre la silice totale et le quartz ($\text{SiO}_2 - \text{Qz}$) inférieure à 3 %.

- Cas des roches siliceuses type quartzites ou grès : Toute la silice est sous forme de quartz dont plus de 65 % sont à extinction franche, et il n'y a pas de micro-quartz de recristallisation à extinction ondulante. On désigne par microquartz de recristallisation les petits cristaux de quartz secondaires, souvent d'origine tectonique, de dimension souvent inférieure à 40 μm , à contours irréguliers qui se situent en bordure des cristaux de quartz primaires de la roche et qui donnent à ces derniers un contour crénelé. (Le Quartz est dur (7 sur Mohs), il n'admet ni macles ni clivage, s'il est subit à une tectonique, il se déforme en se cassant en montrant plusieurs fractures de formes irrégulières à sa surface qui sont à l'origine de cette extinction ondulante. Dans le cas des quartz pas déformés ou peu tectonisés, la surface reste lisse et l'extinction est souvent droite.

- Cas des roches silicatées (granite, andésite, basalte, gneiss, schistes etc) : ces roches ont des compositions pétrographiques variées, les indices de réactivité doivent être recherchés dans la présence de microquartz de recristallisation mais aussi dans l'existence de phase vitreuse ou de variétés de silice, comme la cristobalite et/ou la tridymite parfois en vacuoles) en proportions supérieures à 2 %.

Si les résultats des analyses physico-chimiques et pétrographiques satisfont les critères quantitatifs définis au I, le granulats est considéré comme non réactif NR et aucun autre essai n'est à entreprendre. Si ces analyses révèlent la présence d'espèces réactives en quantité supposée critique ou néfaste : silex (ou de jaspes ou de radiolarites) à plus de 50 % ou d'opale (ou teneur en silice totale ?) à plus de 3 %, dans ce cas là, on vérifie que la présence et la teneur de ces espèces réactives confèrent au granulats une potentialité de réactivité (PR ou PRP) qui peut être testée par l'un des essais normalisés suivants :

II : Essais cribles (XP P 18-594) : On appelle essai crible un essai qui qualifie avec certitude la Non Réactivité d'un granulats en autorisant un classement en NR, PR et PRP. Cette méthode rapide est capable de donner un résultat en une semaine, mais du fait de son agressivité, elle ne peut pas qualifier avec certitude la Réactivité d'un matériau, l'accélération imposée par la procédure opératoire se traduit par une forte agressivité vis-à-vis du matériau. De ce fait, la réactivité réelle, telle qu'elle pourra se développer dans le béton peut être surestimée. Selon les résultats de l'essai crible, la qualification peut être : - NR si le résultat est NR; - PRP si le résultat est PRP précisé par l'essai à long terme.

II.1/ Essai sur mortier par autoclavage : Les potentialités d'expansion des granulats au contact des alcalins sont déterminées par la mesure de variations dimensionnelles dans un essai de gonflement d'éprouvettes de mortier après autoclavage pendant 5 h à la température de 127 °C et à la pression relative de 0,15 MPa en milieu suralcalinisé. Le critère de non réactivité est fixé à une expansion inférieure à 0,15 % sur la moyenne de trois éprouvettes de mortier (calcul de la moyenne des déformations relatives ξ_i de chaque éprouvette : longueur finale L_1 par rapport à la longueur initiale ($L_0 = 160 \text{ mm}$)). Cet essai permet de qualifier un matériau dans l'une des trois classes NR, PR, PRP.

II.2/ Essai cinétique chimique (mesure de la dissolution de la silice (XP P 18-594, XP P 18-542 et P 18-589)) : c'est un essai rapide qui permet de qualifier la non réactivité des granulats (ou un mélange granulaire) en les classant en NR, PR ou PRP.

L'essai consiste à attaquer la fraction granulométrique comprise entre 0 et 0.315 mm (qualification de non réactivité des fines) d'une roche ou d'un granulat broyé, dans des conditions définies, par une solution de soude normale (hydroxyde de sodium NaOH) à 80°C puis à mesurer sur le filtrat, après refroidissement, les concentrations en silice dissoute SiO₂ et sodium restant Na₂O (oxyde de sodium) aux trois échéances de temps suivantes : 24h, 48h et 72h. (Actuellement, la méthode ne s'applique pas aux roches carbonatées argileuses à prédominance dolomitique (réaction alcali-carbonate) : Lorsque la teneur en carbonate de calcium (CaCO₃) est supérieure à 15 %, procéder à une décarbonatation avant la réalisation de l'essai. Lorsque la teneur en alumine (Al₂O₃) est supérieure à 5 %, l'essai ne s'applique pas).

Interprétation des résultats : on procède au calcul du rapport molaire SiO₂/Na₂O pour les trois prises d'essais d'une échéance puis à la moyenne des trois valeurs. On procède de même, pour les trois échéances (24h, 48h et 72h) et on reporte ces valeurs sur un graphique (Figure 5.2), donnant leur évolution en fonction du temps (cinétique de la réaction). Le granulat sera qualifié en fonction de la position de sa courbe représentative dans le graphe, Les ordonnées (concentration molaire SiO₂/Na₂O) correspondantes aux points de séparation des trois zones sont (XP P 18-594) :

	12 h	24 h	48 h	72 h	96 h
Zone NR/PR	0.084	0.12	0.33	0.50	0.66
Zone PR/PRP	0.58	1.06	1.50	1.75	1.95

Une échéance différente est requise dans deux situations :

- Dans le cas d'un granulat qui manifeste une très forte dissolution de silice à 24 h, il faut effectuer un test à une échéance plus brève (8 h ou 12 h) ;
- Dans le cas où l'interprétation de l'essai resterait encore incertaine au bout 72 h (courbe atypique : à la limite de deux zones ou traversant plusieurs zones), il faut pratiquer un test à une échéance ultérieure (96 h, par exemple).

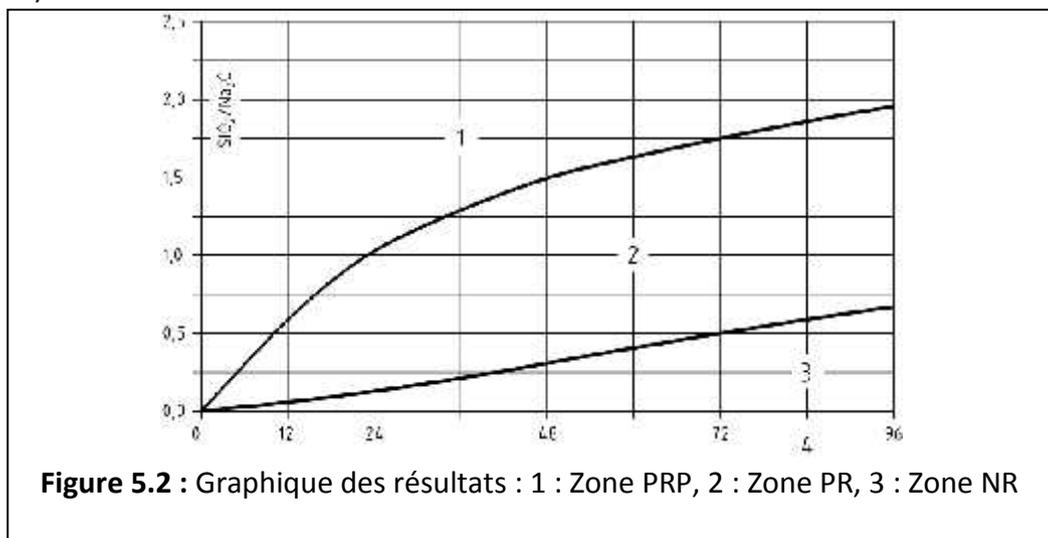


Figure 5.2 : Graphique des résultats : 1 : Zone PRP, 2 : Zone PR, 3 : Zone NR

III : Essai à long terme (XP P 18-594) : On appelle essai à long terme, un essai dont la durée sera de plusieurs mois. La procédure opératoire permet, avec la prise en compte de la démarche pétrographique, de qualifier avec certitude la Réactivité d'un granulat. Dans tous les cas, la qualification (en NR, PR, PRP) obtenue avec cette procédure opératoire doit être préférée à celle issue de l'essai crible.

Le potentiel d'expansion des granulats en milieu humide et en présence d'alcalins, est mesuré par un essai de gonflement d'éprouvettes de béton (Essai de stabilité dimensionnelle) conservées à 38 °C et 100 % d'humidité relative.

Les granulats sont considérés comme réactifs si l'expansion (gonflement) des éprouvettes de béton après 8 mois de durcissement est supérieure à 0.03 % (calcul de la moyenne des déformations relatives ξ_i de chaque éprouvette (longueur finale L_1 par rapport à la longueur initiale $L_0 = 250$ mm) pour les échéances de 1 mois, 2 mois, 3 mois, 4 mois, 6 mois et 8 mois).