

Chapitre 1 :

Les granulats

I.1 Définition

On appelle granulat l'ensemble de grains d'origine minérale, de dimensions comprises entre : 0 et 125 mm, qui selon leur nature, leur forme et leurs caractéristiques varient en fonction des gisements et des techniques de production.

I.2 Types de granulats

Les granulats sont obtenus :

1. En exploitant des gisements de sables et de graviers d'origine alluvionnaire, terrestre ou marine.
2. En concassant des roches massives ; de minerais.
3. Transformations thermiques et de sous-produits de l'industrie.
4. Ou encore par recyclage de produits tels que les bétons de démolition.

Un granulat, en fonction de sa nature et de son origine, peut-être : **Naturel , Artificiel ou Recyclé.**

I.2.1 Granulats naturels

I.2.1.1 Origine minéralogique

Les granulats naturels sont issus de diverses roches. Les plus utilisés pour le béton proviennent de roches sédimentaires siliceuses ou calcaires, de roches métamorphiques telles que le quartz et quartzites, ou de roches éruptives telles que les basaltes, les granites, les porphyres.

Les granulats utilisés pour le béton sont le plus souvent siliceux, calcaires ou silico-calcaires.

I.2.1.2 Catégories de granulats

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

1. Granulats alluvionnaires :

Dits roulés, se caractérisent par leur aspect de grains arrondis et polis dont la forme a été acquise par l'érosion. Trois catégories de granulats roulés existent dans la nature :

- Les granulats de fleuve, rivière (d'oued).
- Les granulats de mer.
- Les granulats de dunes.

Ces granulats sont lavés pour éliminer les particules argileuses, nuisibles à la résistance du béton et criblé pour obtenir différentes classes granulaires.

2. Granulats de carrière :

Ils sont obtenus par abattage et concassage suivi des opérations de criblage ou tamisage pour sélectionner des grains à une dimension précise, ce qui leur donne des formes angulaires. Les granulats concassés présentent des caractéristiques qui dépendent d'un grand nombre de paramètres: origine de la roche, régularité du banc, degré de concassage

Ce type de granulats prouve une très bonne liaison avec la pâte de ciment à cause de leur texture de surface et leur rugosité. D'autre part ils nécessitent plus d'eau pour une maniabilité donnée et ceci est due à leurs angularités et donc à leurs surfaces spécifiques étendues.

I.2.2 Granulats artificiels

Ces granulats provenant de la transformation thermique de roches, de minerais et de sous-produits industriels transformés ainsi que les déchets de l'industrie. On distingue plusieurs types de granulats artificiels qui peuvent être utilisés pour des usages spécifiques.

Sous-produits industriels :

Les plus employés sont les laitiers des hauts fourneaux, utilisés notamment dans les routes.

• *Laitier des hauts fourneaux :*

Le laitier est constitué de toutes les parties minérales contenues dans la charge du haut fourneau (minerai et ajouts) qui subsistent après l'extraction du fer.

A/ Laitier cristallisé concassé :

Il est obtenu par refroidissement lent à l'air libre, en fosse. Il peut être plus ou moins poreux, plus le refroidissement est lent et en couches minces, plus le laitier est cristallisé et compact. Il possède une masse volumique apparente $> 1250 \text{ Kg/cm}^3$, de composition chimique constituée essentiellement de chaux, magnésie, silice et alumine .

B/ Laitier expansé ou bouleté :

Le laitier de coulée subit un traitement spécial : une puissante injection d'eau et une action mécanique. Le laitier expansé à une masse volumique apparente comprise entre 800 et 950 kg/m^3 .

• *Scories d'aciérie :*

Ces laitiers sont des sous-produits de la transformation de la fonte hématite en acier. Traité comme les laitiers de haut fourneau, ce matériau est handicapé par une déferrisation insuffisante qui conduit à une masse volumique élevée d'environ 3300 kg/m^3 .

• *Schistes houillers*

L'industrie minière en général et les houillères en particulier produisent des quantités considérables de matériaux stériles. Ces déchets trouvent des applications importantes dans des terrassements routiers comme granulats.

Granulats à hautes caractéristiques élaborés industriellement :

Il s'agit de granulats élaborés spécialement pour répondre à certains emplois, notamment granulats très durs pour renforcer la résistance à l'usure de dallages industriels (granulats ferreux, carborundum...) ou des granulats réfractaires.

Granulats allégés par expansion ou frittage :

D'une masse volumique variable entre 400 et 800 kg/m^3 , ils permettent de formuler des bétons présentant une bonne isolation thermique avec une faible masse volumique comprise entre 1200 et 2000 kg/m^3 . Les plus usuels sont l'argile ou le schiste expansé et le laitier expansé.

Granulats très légers :

Ils sont d'origine aussi bien végétale et organique que minérale (bois, polystyrène expansé). Ils sont particulièrement adaptés pour les bétons d'isolation, mais également pour la réalisation d'éléments légers : blocs coffrant, blocs de remplissage ou rechargements sur planchers peu résistants.

Granulats lourds

Les granulats lourds se caractérisent par leur densité élevée. Ils sont utilisés essentiellement pour la fabrication de bétons lourds. Comme les déchets ferreux dont la densité varie de 7,4 à 7,7, .

I.2.3 Granulats recyclés :

Le granulat recyclé est le résultant de la transformation de matériaux inorganiques antérieurement utilisés en construction. Dans cette catégorie se rangent des granulats, comme le béton concassé, le fraisât d'enrobés bitumineux. Etc...

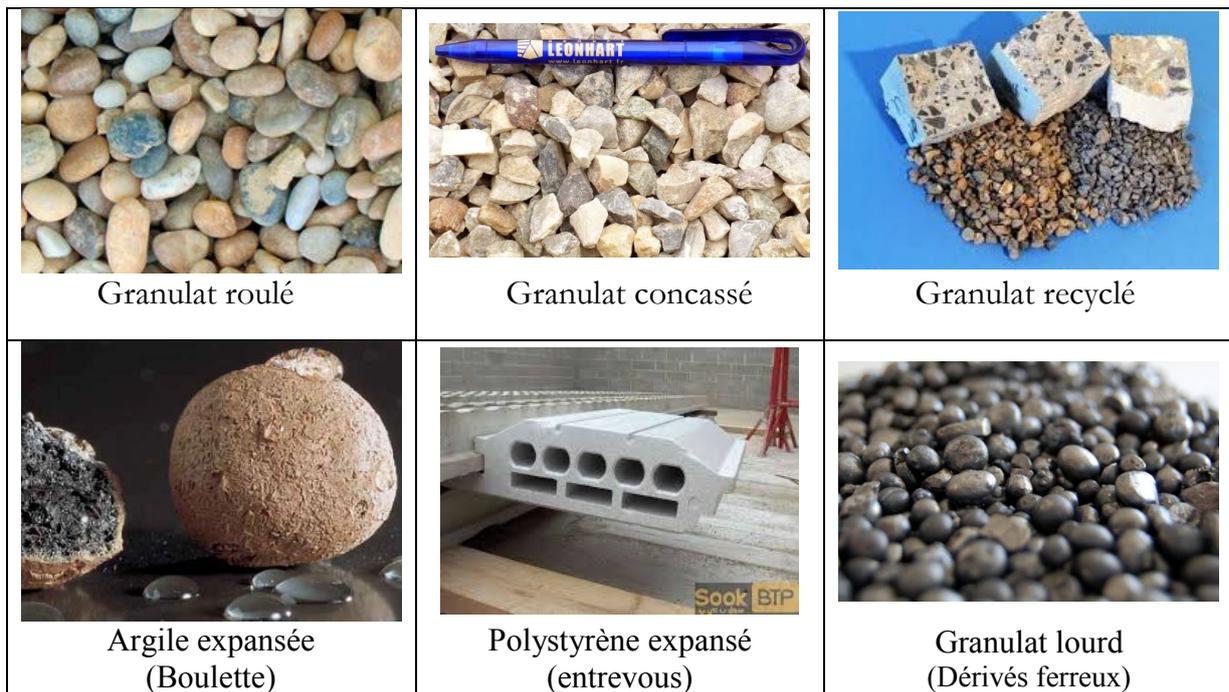


Figure I-1 Différents types de granulats



Figure I.1 Photos des différents types de granulats

I.3 Techniques de fabrication des granulats

Les procédés de fabrication diffèrent selon l'origine des granulats.

1/ Extraction de la matière première	Extraction ce fait à l'aide abattage à l'explosif pour les roches dures, et par pelle mécanique pour les roches moins dures (granulats concassés).	
2/ Concassage	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Opération primordiale (granulats concassés), et moins intéressante (granulats alluvionnaires). ➤ Concasseurs à mâchoires: ce sont des Concasseurs primaires à simple effet, munis d'un système oscillant. Débit suivant le matériau : jusqu'à 15 tonnes/h. 	
3/ Criblage	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Criblage se fait sur tamis (granulats concassés), mais il s'effectue sous l'eau (granulats alluvionnaires). ➤ Le cribleur-laveur sépare les plus gros éléments du reste de la roche. Ces éléments les plus gros vont être subi un 2^{ème} concassage. 	
4/ Stockage avant expédition	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Stockage à l'air libre (en vrac ou en sacs). ➤ Stockage en silos 	

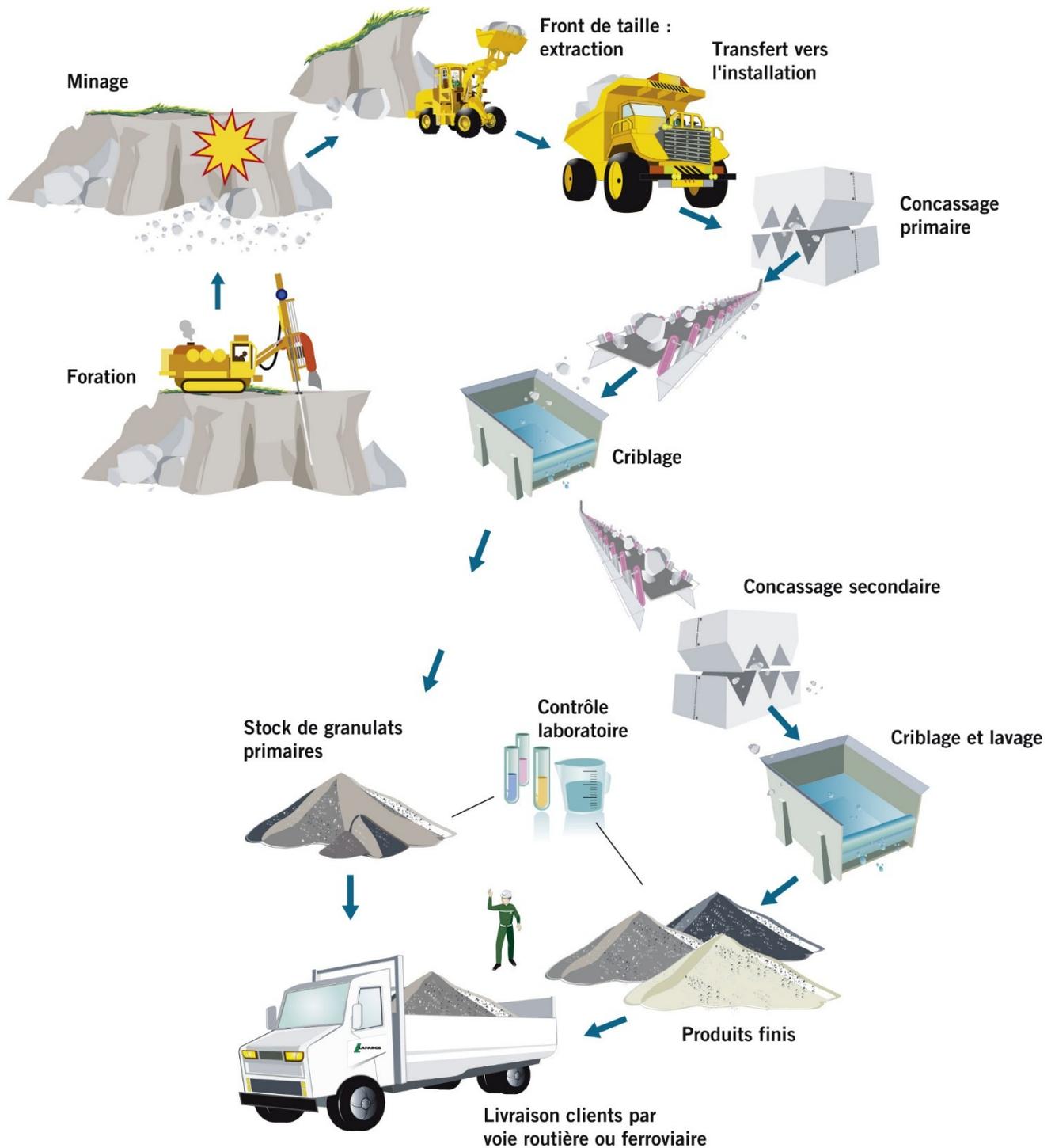


Figure I-2 *Fabrication des granulats en roche massive*

I.4 Utilisation de granulats

Les granulats sont utilisés pour la réalisation d'ouvrages de Génie Civil, de travaux routiers et de bâtiments. Ils peuvent être utilisés :

- 1/ Directement sans liant : ballast de voies ferrées, couches de forme des structures routières remblais;
- 2/ Solidarisés avec un liant : le ciment pour le béton et les mortiers, le bitume pour les enrobés.



Ballast de voies ferrées



Couche de fondation



Drainage



Liant ciment = Béton



Liant Bitum = Enrobé

Figure I.1 Utilisation des granulats avec et sans liant

I.5 Caractéristiques principales des granulats

La nature minérale des granulats est un critère fondamental pour son emploi, Il doit répondre à des exigences et des critères de qualité et de régularité qui dépendent, d'une part, de la nature de la roche (résistance aux chocs et à l'usure, caractéristiques physico-chimiques,...) et, d'autre part, de caractéristiques physiques liées au processus d'élaboration des granulats (dimensions, formes, propreté,...).

Les caractéristiques des granulats sont fonction de leur famille (gravillons, sables, sablons, fillers) et font l'objet de méthode d'essais et de détermination adaptée.

I.5.1 La masse volumique

La masse volumique est une grandeur physique qui caractérise la masse d'un matériau par unité de volume. Elle est généralement notée par les lettres grecques ρ (Rhô).

$$\rho = \frac{M}{V}$$

Avec :

ρ : Masse volumique, exprimée en : (g/cm^3) , (kg/m^3) et (t/m^3)

M : Masse exprimée en : (g) , (kg) ou en tonne (t) .

V : Volume, exprimée en : (cm^3) et (m^3)

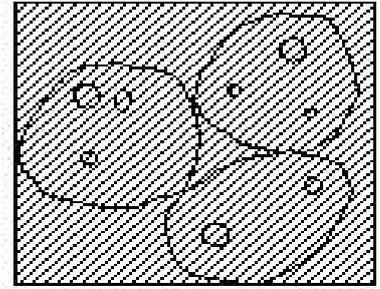
I.5.1.1 Masse volumique apparente

La masse volumique apparente d'un matériau est la masse volumique d'un mètre cube du matériau pris en tas, comprenant à la fois des vides perméables et imperméables de la particule ainsi que les vides entre particules.

$$\rho_{app} = \frac{M_{mat}}{V_{app}}$$

Avec :

$$V_{app} = V_{granulat} + V_{vide\ entre\ grains} + V_{vide\ Inter-grains}$$



Volume hachuré = Volume du récipient

Pour les granulats usuels de construction (sable, graviers, etc.) cette masse volumique varie entre 1 400 et 1 600 kg/ m³.

1.5.1.2 Masse volumique réelle

C'est le rapport entre la masse de matériau et le volume réel des grains (somme des volumes élémentaires des grains y compris le volume des pores fermés).

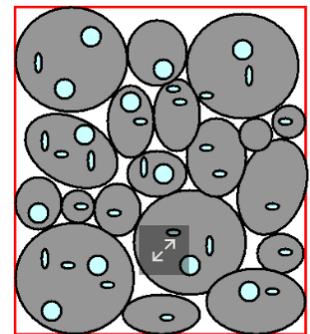
$$\rho_{réel} = \frac{M_{mat}}{V_{réel}}$$

Avec :

$$V_{réel} = V_{granulat} + V_{vide\ Inter-grains}$$

Les granulats sont considérés comme :

- ✓ Granulat Lourd : Granulat de masse volumique supérieure à 3000 kg/m³
- ✓ Granulat Courant : lorsque sa masse volumique est supérieure à 2000 kg/m³
- ✓ Granulat Léger : si elle est inférieure à 2 t/m³.



Volume apparent

Volume réel

Volume des pores

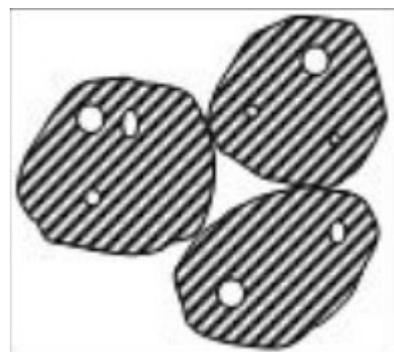
Pour les granulats courants, cette masse volumique varie entre 2 500 et 2 650 kg/m³.

1.5.1.3 Masse volumique absolue

$$\rho_{abs} = \frac{M_{mat}}{V_{abs}}$$

Avec :

$$V_{abs} = V_{réel} - V_{pores}$$



Volume hachuré = Volume absolu (sans pores)

1.5.2 Porosité, compacité et indice de vide

I.5.2.1 Porosité

La porosité est définie comme le rapport entre le volume des vides et le volume total d'un matériau poreux. On peut aussi définir la porosité comme le volume de vide par unité de volume apparent.

C'est une grandeur physique comprise entre 0 et 1 (ou, en pourcentage, entre 0 et 100 %).

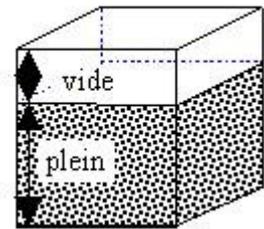
$$P = \frac{V_{pores}}{V_{Tot}} \cdot 100 (\%)$$

Avec :

P : la porosité exprimé en pourcentage, de 0 à 100%.

V_{pores} : Volume des pores

$V_{Tot} = V_{solide} + V_{pores}$: Volume total du matériau



$$P = \frac{V_{pores}}{V_{Tot}}$$

I.5.2.2 Compacité

La compacité est le rapport du volume des pleins au volume total. Ou volume des pleins par unité de volume apparent

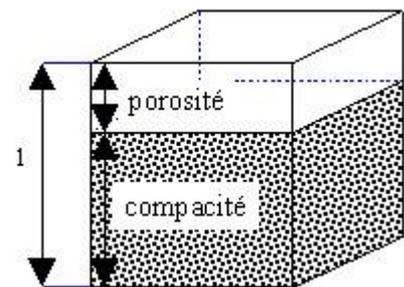
$$C = \frac{V_{mat}}{V_{Tot}} \cdot 100 (\%)$$

Avec :

C : La compacité exprimé en %, de 0 à 100%.

V_{mat} : Volume du matériau

$V_{Tot} = V_{solide} + V_{pores}$: Volume total du matériau



Remarque :

La porosité et la compacité sont liées par la relation: $P + C = 1$ ou $P + C = 100\%$

I.5.2.3 Indice de vide :

L'indice de vide c'est le rapport entre la porosité et la compacité.

$$I = \frac{P}{C}$$

I.5.3 Teneur en eau

La teneur en eau d'un matériau est le rapport du poids d'eau contenu dans ce matériau au poids du même matériau sec. On peut aussi définir la teneur en eau comme le poids d'eau W contenu par unité de poids de matériau sec. exprimé en pourcentage (%).

$$W = \frac{E}{M_{sèche}} = \frac{M_{humide} - M_{sèche}}{M_{sèche}} \times 100 (\%)$$

Ou :

E : Masse d'eau dans le matériau ;

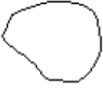
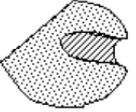
M_{humide} : Masse du matériau humide ;

$M_{sèche}$: Masse du matériau séché à 105 ± 5 °C.

L'absorption d'eau peut varier suivant la nature du granulat. En général, les granulats naturels utilisés pour la confection du béton sont peu poreux et n'absorbent pratiquement pas d'eau. Par contre, les granulats artificiels légers, tels l'argil expansé. Elle peut varier de 0 à plus de 30 %.

Remarque : Il faut alors tenir compte de l'absorption de l'eau par les granulats lorsque l'on détermine la quantité d'eau requise pour fabriquer le béton.

La figure suivante montre les divers cas qui peuvent se présenter lorsqu'un granulat est poreux et qu'il est ou a été en contact avec de l'eau.

TENEUR EN EAU			
 SEC (dessiccation jusqu'à poids constant)	 NATURELLEMENT SEC (séchage naturel à l'air)	 SATURE SURFACE SECHE	 SATURE SURFACE HUMIDE
 PORE GRANULAT PAS D'EAU DANS DES PORES	 UN PEU D'EAU DANS DES PORES	 PORES REMPLIS D'EAU SURFACE SECHE	 PORES REMPLIS D'EAU SURFACE HUMIDE
SI LES GRANULATS SONT POREUX, UNE PARTIE DE L'EAU DE GACHAGE EST ABSORBEE PAR LES GRANULATS		PAS D'ECHANGE D'EAU ENTRE GRANULAT ET PATE DE CIMENT	L'EAU A LA SURFACE DES GRANULATS DILUE LA PATE DE CIMENT ET DOIT ETRE COMPACTEE COMME EAU DE GACHAGE

I.5.4 Taux d'absorption d'eau

Le taux d'absorption d'eau **Ab** (%) est le rapport de la masse d'eau absorbée à la masse sèche de l'échantillon. Il est déterminé selon la norme **NF EN 1097-6**, et calculé selon la formule suivante:

$$Ab (\%) = \frac{M_{eau} - M_{sèche}}{M_{sèche}} \times 100$$

- M_{eau} en (g): la masse du l'échantillon saturé dans l'eau (24 h) après avoir épongé soigneusement avec un chiffon absorbant l'eau à la surface des granulats ou plus connue sous le nom SSS (Saturé à Surface Sèche),
- $M_{sèche}$ en (g): la masse de l'échantillon séché à 105 ± 5 °C,

I.5.5 Propreté des granulats :

La **propreté** désigne d'une part, la teneur d'éléments fins indésirables, soit des fines d'argile, soit des fines issues du concassage ou du broyage des roches. D'autre part, les impuretés tel que : les scories, le charbon, les fragments de bois, les feuilles mortes, etc....

Remarque : Les granulats employés pour le béton doivent être propres, car les impuretés perturbent l'hydratation du ciment et empêchent l'adhérence entre les granulats et la pâte cimentaire.

1. Détermination du pourcentage d'impureté dans les graviers

La propreté des graviers est déterminée à partir de l'essai de propreté superficielle NF P 18-591, l'essai est effectué par lavage d'une quantité de gravier ($200 D < M < 600 D$) sur le tamis $0,5 \text{ mm}$ et en déduire la différence de masse après séchage. Elle est déterminée d'après la formule suivante:

$$\text{ImP} = \frac{M_1 - M_2}{M_1} \cdot 100 (\%)$$

- M_1 en (g): la masse de l'échantillon initial.
- M_2 en (g): la masse de après lavage, séché à 105°C .

2. Détermination du pourcentage d'impureté dans les sables (Essai de l'équivalent de sable) :

Le degré de propreté des sables est fourni par l'essai appelé "**équivalent de sable**" (ES), selon la norme NF EN 933-8 et complété par l'essai au bleu de méthylène (VB), selon la norme EN 933-9.

L'ES consiste à séparer le sable des particules très fines qui remontent par floculation à la partie supérieure de l'éprouvette (tube) où l'on a effectué le lavage.

L'essai est fait uniquement sur la fraction de sable $0/2$ mm. Il est déterminé selon la formule suivante:

$$ES = \frac{h_1}{h_2} \times 100 (\%)$$

- h_1 en (cm): la hauteur totale y compris le floculat (fines en suspension).
- h_2 en (cm): la hauteur du dépôt de sable visible.

La valeur de ES doit selon les cas être supérieure à 60 (ESP) ou 65 % (ESV).

La valeur du Bleu de Méthylène est déterminée sur la fraction $0/2$ mm et calculée selon la formule suivante:

$$VB = \frac{V}{m}$$

V en (ml): le volume du bleu de méthylène.

m en (g): la masse de l'échantillon ($0-2\text{mm}$).

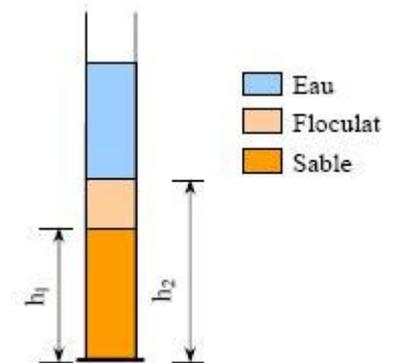


Figure I-3 Essai au Bleu de Méthylène

I.6 Caractéristiques géométrique des granulats

Les caractéristiques de fabrication sont liées aux procédés d'exploitation et de production des granulats telles que, en particulier :

- ✓ La granularité: arrondés ou anguleux ;
- ✓ La forme : sphérique, cubiques, aplatis ou allongés ;

Forme	Granulats roulés		Granulats concassés	
	sphérique	aplatis/allongés	cubiques	aplatis/allongés
				
Angularité	arrondis		anguleux	
Etat de surface	lisses		rugueux	
Surface spécifique, demande en eau	croissante \longrightarrow			
Ouvrabilité, aptitude au compactage	décroissante \longrightarrow			

Figure I-4 Influence de la forme et de l'état de surface des grains sur les propriétés du béton frais.

I.6.1 Coefficient d'Aplatissement (A) :

La forme d'un granulat est définie par trois grandeurs géométriques:

- La longueur L, distance minimale de deux plans parallèles tangents aux extrémités du granulat,
- L'épaisseur E, distance minimale de deux plans parallèles tangents au granulat,
- La grosseur G, dimension de la maille carrée minimale du tamis qui laisse passer le granulat.

Le coefficient d'aplatissement A d'un ensemble de granulats est le pourcentage pondéral des éléments qui vérifient la relation : $\frac{G}{E} > 1,58$.

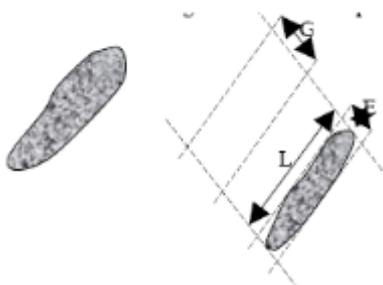


Figure I-5 Forme d'un granulat



Figure I-6 Tamis à fentes

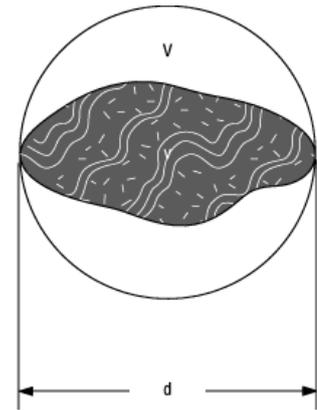
I.6.2 Coefficient de forme (volumétrique)

Le coefficient volumétrique C est le rapport entre le volume v d'un grain donné et celui de la sphère circonscrite de diamètre d.
d : la plus grande dimension du grain.

$$C = \frac{v}{\frac{\pi d^3}{6}}$$

Pour un granulat constitué d'un ensemble de grains on a :

$$C = \frac{\sum v}{\sum \frac{\pi d^3}{6}} = \frac{v}{\frac{\pi}{6} \sum d^3}$$



Lorsque le coefficient volumique est faible, le granulat présente un certain nombre de plats, d'éclats et d'aiguilles. Lorsque le coefficient est élevé, on dit le granulat cubique ou arrondi.

Remarque : Il est préconisé pour les bétons, un **coefficient** de : 0,15 à 0,25 pour les gravillons de 12,5 à 25 mm ; 0,11 à 0,15 pour les cailloux de 25 à 50 mm.

I.6.3 Classification des granulats

Pour procéder à la classification des granulats, on a affaire à un essai appelé "analyse granulométrique". L'essai consiste à fractionner au moyen d'une série de tamis (mailles carrées) un matériau en plusieurs classes granulaires de tailles décroissantes. On trie les granulats par dimension au moyen de tamis et on désigne une classe de granulats par un ou deux chiffres.

La série de tamis dont les mailles ont les dimensions suivantes en mm :

0,063 - 0,08 - 0,10 - 0,125 - 0,16 - 0,20 - 0,25 - 0,315 - 0,40 - 0,50 - 0,63 - 0,80 - 1 - 1,25 - 1,60 - 2 - 3,15 - 4 - 5 - 6,30 - 8 - 10 - 12,50 - 14 - 16 - 20 - 25 - 31,50 - 40 - 50 - 63 - 80 - 100 - 125.

Les tamis dont les dimensions sont soulignées et notées en gras correspondent à la série de base préconisée par la Norme NF EN 933-2; de ce fait, lors de l'étude granulométrique, utiliser prioritairement ces tamis.



Figure I-7 Photos des tamis pour granulats

Chaque tamis est désigné par un numéro de module (Tableau suivant).

Tableau : Série de tamis d'ouvertures de mailles normalisées

Module	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Maille	0,063	0,08	0,1	0,125	0,16	0,2	0,25	0,315	0,40	0,5	0,63	0,80
Module	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42
Maille	1,0	1,25	1,6	2,0	2,5	3,15	4,0	5,0	6,3	8	10	12,5
Module	43	44	45	46	47	48	49	50				
Maille	16	20	25	31,5	40	50	63	80				

Remarque : Les granulats naturels concassés sont commercialisé avec des classes granulaires 0/5, 3/8, 5/15 et 15/25.

1.6.3.1 Classe granulaire

Un granulat est désigné par sa **classe granulaire** exprimée par le couple (**0/D**) ou (**d/D**) avec:

d : dimension inférieure du granulat (ouverture de maille du tamis par laquelle le granulat ne passe pas).

D : dimension supérieure du granulat (ouverture de maille du tamis par laquelle le granulat passe).

- Un granulat est dit granulat du type (*d*) quand il est $\geq 0,5$ mm. Ex : Sable 0/4,.
- La terme "granulat d/D" est réservé aux granulats dont les dimensions s'étalent de (*d*) pour les petits à (*D*) pour les grands. Gravier 5/15 ; Gravier 15/25.

1.6.3.2 Analyse granulométrique

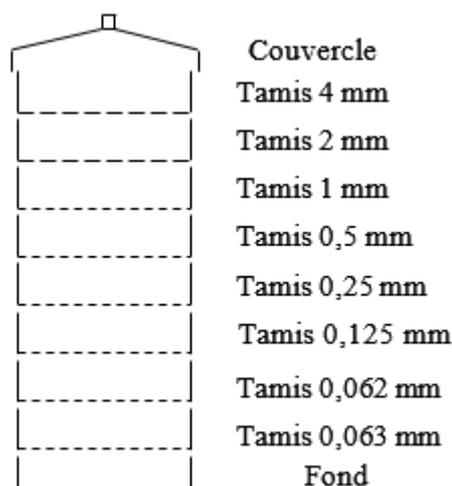
L'analyse granulométrique consiste à déterminer la distribution dimensionnelle des grains constituant un granulat.

Les masses des différents **refus** ou celles des différents **tamisats** sont rapportées à la masse initiale du matériau. Les pourcentages ainsi obtenus seront exploités, soit sous leur forme numérique, soit sous une forme graphique (**courbe d'analyse granulométrique**).

En déduire ensuite les refus et les tamisats cumulés en poids (gramme) et en pourcentage comme le montre le tableau suivant.

Le refus est la partie des granulats qui resté sur le tamis.

Le tamisât (ou passant) est la partie des granulats qui passe a travers le tamis.



Disposition des tamis pour l'analyse du sable

la masse initiale (M) de matériau est prise sèche et dans les limites définies par la formule suivante :

$$200 D \leq M \leq 600 D$$

Où :

D : est le diamètre en millimètres des grains les plus gros et M : en Grammes.

Tableau 2.2 : Résultats de l'analyse granulométrique

Maille des Tamis (mm) (en ordre décroissant)	Masse du refus partiel (g)	Masse du refus cumulé (g)	Refus cumulé en Pourcentage (%)	Tamisât cumulé en Pourcentage (%)

- Masse du refus cumulé (g) : R_i
- Refus cumulé en Pourcentage (%) : $\frac{R_i}{M_s} \times 100$
- Tamisât en Pourcentage (%) : $100 - (\frac{R_i}{M_s} \times 100)$

Remarque : pour que l'essai soit valide, la somme de refus cumulé et le tamisât au dernier tamis ne doit pas différer de plus de 2 % de la masse initiale soumise à l'essai.

Exemple pratique:

		SR		1217 g
Tamis	Masse du Refus	Masse cumulée	Refus cumulé	Tamisât cumulé
5,00	0	0,00	0,00	100,00
4,00	0	0,00	0,00	100,00
3,15	4,4	4,40	0,36	99,64
2,00	237	241,40	19,84	80,16
1,00	209,1	450,50	37,02	62,98
0,8	150,4	600,90	49,38	50,62
0,500	143,4	744,30	61,16	38,84
0,315	142,4	886,70	72,86	27,14
0,25	60	946,70	77,79	22,21
0,200	42,5	989,20	81,28	18,72
0,125	50	1039,20	85,39	14,61
0,10	46	1085,20	89,17	10,83
0,080	26,4	1111,60	91,34	8,66
0,063	17,4	1129,00	92,77	7,23
Fond	87,2	1216,20	99,93	0,07

Courbes granulométriques : Les masses des différents refus sont rapportées à la masse initiale du matériau et exprimées en pourcentage, servent pour tracer la courbe granulométrique sur un graphique comportant en ordonnée le % des refus et les mailles D sont indiquées en abscisse.

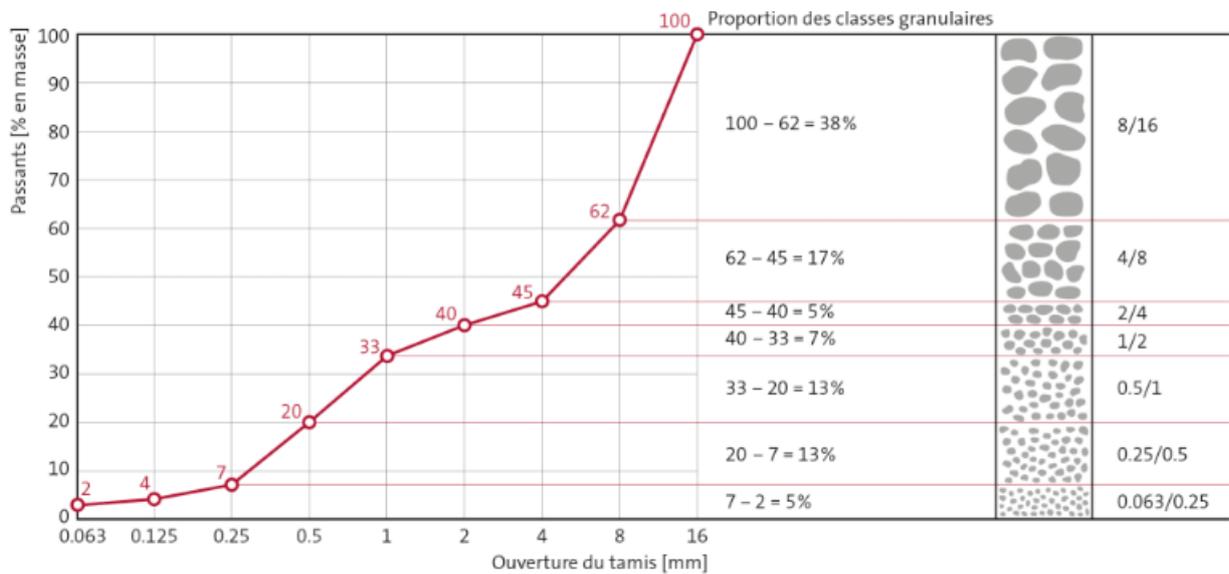
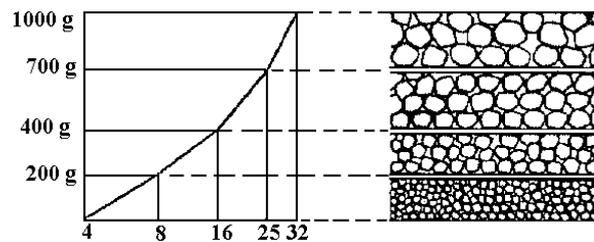
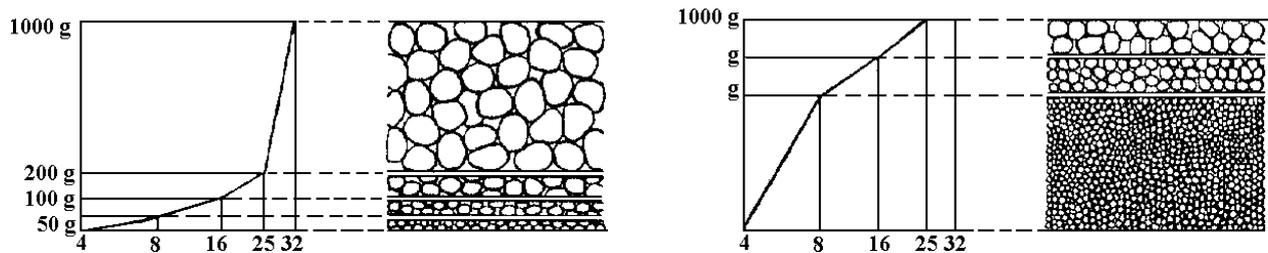


Figure I-8 Exemple d'une courbe granulométrique pour une grave 0-16 mm (échelle logarithmique).



Exemple des courbes granulométrique homogènes (régulier)



Exemple des courbes granulométrique non homogènes

Il est possible de réaliser des mélanges de granulats pour obtenir des distributions granulaires adaptées à chaque utilisation.

Le Module de Finesse:

Le module de finesse des sables est déterminé selon la norme XP P 18-540, et calculé selon la formule suivante:

$$MF = \frac{1}{100} \sum \text{Refus cumulés en \% des tamis (0,125 - 0,25 - 0,5 - 1 - 2 - 4 mm)}.$$

Si :

- Pour $1,8 \leq Mf \leq 2,2$: le sable a une majorité d'éléments fins et très fins, ce qui nécessite une augmentation du dosage en eau. le sable est à utiliser si l'on recherche particulièrement la facilité de mise en œuvre au détriment probable de la résistance.
- Pour $2,2 < Mf \leq 2,8$: le sable est à utiliser si l'on recherche une ouvrabilité satisfaisante et une bonne résistance avec des risques de ségrégation limités. *C'est Un bon sable.*
- Pour $2,8 < Mf \leq 3,2$: le sable manque de fin et le béton y perd de l'ouvrabilité. le sable est à utiliser si l'on recherche des résistances élevées au détriment de l'ouvrabilité et avec des risques de ségrégation.
- Pour $Mf > 3,2$ le sable est à rejeter.

La correction d'un granulat est nécessaire lorsque sa courbe granulométrique présente une discontinuité ou lorsqu'il y a un manque ou un excès de grains dans une zone de tamis. La correction consiste à compenser ces écarts par un apport d'un autre granulat jusqu'à obtention d'un mélange présentant les qualités recherchées. Cette pratique est habituelle pour modifier le module de finesse (Mf) des sables de bétons hydrauliques.

I.6.4 Caractéristiques Mécaniques des Granulats :

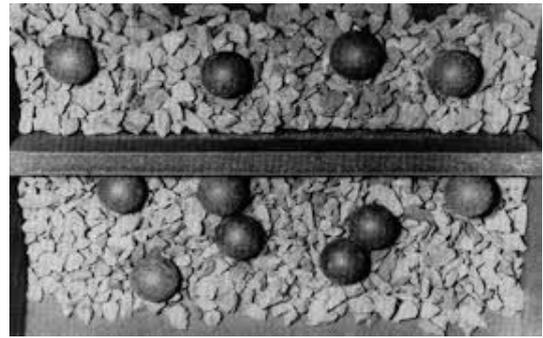
– Résistance de dureté (Essai Los-Angeles (LA)):

La résistance de dureté (au choc) est déterminée par l'essai Los-Angeles selon la norme NF P 18-573. L'essai est pratiqué sur les fractions granulaires (4/6,3 - 6,3/10 - 10/14 mm) et de 9 à 11 boulets normalisés de masse de : 3960 à 4840 g (440 g la boule). Après avoir mis le matériau et les boulets dans le cylindre de la machine, cette dernière est mise en route avec à une vitesse régulière de 30-33 tr/min. Après 500 rotations, la masse (m) d'éléments inférieurs à 1,6 mm, produits par la fragmentation du matériau testé et que l'on soumet aux chocs de boulets normalisés, dans le cylindre en 500 rotations à une vitesse régulière de 30-33 tr/min .

L'essai Los-Angeles est pratiqué sur deux fractions 6,3-10 et 10-14 mm et le nombre de boulets est 9 et 11, d'une masse total 3 960 et 4 840 grammes respectivement. Les matériaux sont lavés, tamisés et séchés à l'étuve à 105°C, jusqu'à masse constante. Le coefficient Los-Angeles est déterminé par la formule :

$$L_A = \left(\frac{m}{M} \right) \times 100$$

Ou: m : représente le passant du matériau au tamis 1,6 mm après essai en (g).
 M : la masse initiale en (g), $M = 5000 \pm 5$ g.



– **Résistance à l'usure (Essai Micro-Deval (MDE)):**

La résistance à l'usure est déterminée par l'essai Micro-Deval, selon la norme NF EN 1097-1

Le principe consiste à introduire dans les cylindres de la machine une masse de $M = 500$ g de granulats de classe (4/6,3 - 6,3/10) et la charge abrasive (bielles en acier de 10 mm de diamètre). Les essais s'effectuant à sec ou bien humide dans ce cas en ajoute 2,5 litres d'eau.

Après rotation de cylindres à vitesse = 100 tours/min pendant deux (02) heures (ou 12 000 tour), on tamise sur un tamis de 1,6 mm et peser le refus. Le coefficient Micro-Deval est déterminé par la formule suivante :

$$M_{DE} = \left(\frac{M - m'}{M} \right) \times 100 = \left(\frac{m}{M} \right) \times 100$$

Ou: m : représente la masse sèche de la fraction du matériau passant après l'essai au tamis de 1,6 mm, en (g).

m' : représente la masse sèche du refus au tamis 1,6 mm, en (g).

M : la masse initiale sèche de l'échantillon en (g), $M = 500 \pm 2$ g.

- Lorsque l'essai est réalisé à sec on obtient M_{DE}
- Lorsque l'essai s'effectue avec l'eau on obtient M_{DS}



I.7 Normalisation des granulats

Les granulats comme la grande majorité des matériaux de construction doivent être conformes à des normes. Les caractéristiques contrôlées dans ces normes et les niveaux de valeurs à respecter sont fonction des types d'ouvrages à réaliser et des techniques de mise en œuvre des matériaux. Les spécifications auxquelles doivent satisfaire les granulats sont précisées dans deux principales normes de référence : NF P 18-545 et NF EN 12620 .

1. Norme NF p 18-545

La norme NF P 18-545 « Granulats : Eléments de définition, conformité et codification » définit les règles générales permettant d'effectuer les contrôles des granulats. Elle précise les spécifications auxquelles doivent répondre les granulats en fonction des divers usages possibles :

- granulats pour chaussées : couches de fondation et couches de base, couches de roulement utilisant des liants hydrocarbonés ou en béton de ciment,
- granulats pour bétons hydrauliques et mortiers,
- granulats pour voies ferrées (assises, ballast).

🔴 Granulats pour bétons hydrauliques

La norme NF P 18-545 précise dans l'article 10 : Granulats pour bétons hydrauliques et mortiers, les spécifications (valeurs limites, valeurs spécifiées et tolérances) sur les granulats destinés à constituer des bétons.

Elles concernent les caractéristiques suivantes :

1. Caractéristiques applicables aux gravillons
 - Los Angeles : LA
 - Sensibilité au gel – dégel : G
 - Granularité et teneur en fines des gravillons : Gr
 - Aplatissement : A
 - Éléments coquilliers des gravillons d'origine marine : Cq
 - Boulettes d'argiles
2. Caractéristiques applicables aux sables et graves
 - Granularité et teneur en fines : Gr
 - Module de finesse : FM
 - Propreté : P
 - Polluants organiques
3. Caractéristiques applicables aux sables, graves et gravillons
 - Absorption d'eau
 - Impureté prohibées
 - Alkali-réaction
 - Soufre total : S
 - Sulfates solubles dans l'acide : AS
 - Chlorures

➤ Granulats pour chaussées en béton de ciment

La norme NF P 18-545 précise dans l'article 9, les spécifications sur les granulats destinées à réaliser des bétons de chaussées.

Les spécifications concernent les caractéristiques suivantes :

1. Caractéristiques applicables aux gravillons
 - Caractéristiques intrinsèques Micro deval
 - Los Angeles : LA et Micro deval : M_{DE}
 - Sensibilité au gel
 - Caractéristiques de fabrication
 - Boulette d'argile

2. Caractéristiques applicables aux sables et graves
 - Friabilité des sables : FS
 - Caractéristiques de fabrication
 - Polluants organiques
 - Teneur en carbonate

3. Caractéristiques applicables aux sables, aux graves et aux gravillons
 - Absorption d'eau : WA
 - Impuretés prohibées : ImP
 - Soufre total : S
 - Sulfates solubles dans l'acide : SA
 - Chlorures

➤ Granulats pour bétons légers

La norme NF P 18-545 donne, dans l'article 13, les spécifications sur les granulats légers pour bétons hydrauliques et mortiers. Elles sont relatives aux caractéristiques géométriques (granularité et formes), physiques (masse volumique et absorption d'eau), mécaniques (résistance au gel-dégel) et chimiques.

2. Norme NF en 12620

La norme NF EN 12620 : « Granulats pour béton » définit les termes relatifs aux granulats pour béton relevant du Règlement Produits de Construction (RPC). Elle spécifie les caractéristiques des granulats et des fillers utilisés dans la fabrication des bétons qui peuvent être élaborés à partir de matériaux naturels, artificiels ou recyclés. Elle concerne en particulier les bétons conformes à la norme NF EN 206/CN, les granulats entrant dans la composition des produits préfabriqués en béton et les bétons routiers.

Elle s'applique aux granulats dont la masse volumique réelle est supérieure à 2000 kg/m³.

Elle spécifie les caractéristiques (physiques et chimiques) relatives à l'évaluation de la conformité des granulats et au système de maîtrise de la production.

La norme NF EN 12620 définit pour chaque caractéristique physique ou mécanique spécifiant les granulats, des catégories de valeurs maximales dont en particulier :

- Caractéristiques géométriques
 - Granularité
- Caractéristiques géométriques
 - Forme des gravillons
- Caractéristiques physiques
 - Résistance à la fragmentation

La norme distingue des catégories des valeurs maximales du coefficient Los Angeles (par exemple catégorie LA₃₀ si le coefficient de Los Angeles est inférieur à 30) et des catégories de valeurs maximales de résistances au choc.

- Résistance à l'usure des gravillons

Elle définit des catégories de valeurs maximales de la résistance à l'usure des gravillons en fonction des valeurs de coefficient micro deval (par exemple catégorie M_{DE}25 si le coefficient Micro Deval est inférieur à 25).

- Résistance au polissage

Les catégories de valeurs minimales de résistance au polissage sont définies en fonction des valeurs du coefficient de polissage accéléré (par exemple CPA₅₀ si le coefficient de polissage accéléré est supérieur à 50).

- Caractéristiques chimiques teneur en chlorures composés contenant du soufre
 - sulfates solubles dans l'acide
 - soufre total
- autres constituants
 - constituants réduisant le temps de prise et la résistance du béton
 - teneur en carbonate des sables
 - réactivité aux alcalis

3. Normes d'essais pour les granulats

▪ Essai pour déterminer les propriétés générales des granulats

- NF EN 932-1 Partie 1 Méthodes d'échantillonnage
- NF EN 932-2 Partie 2 Méthodes de réduction d'un échantillon en laboratoire
- NF EN 932-3 Partie 3 Procédures et terminologie pour une description Pétrographique simplifiée
- NF EN 932-5 Partie 5 Équipements communs et étalonnage
- NF EN 932-6 Partie 6 Définition de la répétabilité et de la reproductibilité
- NF EN 933-1 Partie 1 Détermination de la granularité – Analyse par tamisage
- NF EN 933-2 Partie 2 Détermination de la granularité – Tamis de contrôle
- NF EN 933-3 Partie 3 Détermination de la forme des granulats – Coefficient d'aplatissement
- NF EN 933-5 Partie 5 Détermination du pourcentage de surfaces cassées dans les gravillons
- NF EN 933-6 Partie 6 Évaluation des caractéristiques de surface – Coefficient d'écoulement des granulats
- NF EN 933-7 Partie 7 Détermination de la teneur en éléments coquilliers
- NF EN 933-8 Partie 8 Évaluation des fines – Équivalent de sable

-
- NF EN 933-9 Partie 9 Évaluation des fines – Essai au bleu de méthylène
 - NF EN 933-10 Partie 10 Détermination des fines – Granularité des fillers (tamisage dans un jet d'air)
 - **Essai pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats**
 - NF EN 1097-1 Partie 1 Détermination de la résistance à l'usure (Micro-Deval)
 - NF EN 1097-2 Partie 2 Méthodes pour la détermination de la résistance à la fragmentation
 - NF EN 1097-3 Partie 3 Méthodes pour la détermination de la masse volumique en vrac et de la porosité inter-granulaire
 - NF EN 1097-4 Partie 4 Détermination de la porosité du filler sec compacté
 - NF EN 1097-5 Partie 5 Détermination de la teneur en eau par séchage en étuve ventilée
 - NF EN 1097-6 Partie 6 Détermination de la masse volumique réelle et de l'absorption d'eau
 - NF EN 1097-7 Partie 7 Détermination de la masse volumique réelle du filler – Méthode au pycnomètre
 - NF EN 933-8 Partie 8 Détermination du coefficient de polissage accéléré
 - **Essai pour déterminer les propriétés thermiques et l'altérabilité des granulats**
 - NF EN 1367-1 Partie 1 Détermination de la résistance au gel / dégel
 - NF EN 1367-2 Partie 2 Essai au sulfate de magnésium
 - **Essais pour déterminer les propriétés chimiques des granulats**
 - NF EN 1744-1 Partie 1 Analyse chimique
 - NF EN 1744-3 Partie 3 Essai de lixiviation dans l'eau
 - FD P 18-542, Granulats naturels courants pour bétons hydrauliques – Critères de qualification des granulats vis-à-vis de l'alcali réaction
 - XP P 18-566, Granulats – Analyse granulométrique, aplatissement et allongement – Essai à l'aide d'un appareil d'ombroscopie
 - NF P 18-576, Mesure du coefficient de friabilité des sables
 - XP P 18-580, Granulats – Mesure de la résistance au polissage accéléré des Gravillons – Méthode par projection
 - XP P 18-581, Granulats – Dosage rapide des sulfates solubles dans l'eau – Méthode par spectrophotométrie
 - XP P 18-594, Méthodes d'essai de réactivité aux alcalins