

Faculté de technologie

Département de Génie mécanique

Mastère 2, S3, option Technique de production

*Le chef de département Mansour rokbi, le chef de filière Said Zerguane et le chef d'option
Ali debih*

Cours «de technologies des matériaux de construction 2 » Première partie

Année 2020/2021

Table de matière

I.	Les granulats	
I.1.	Définition – Utilisation	
I.1.1.	Définition	
I.1.2.	Utilisation.....	
I.2.	Classification des granulats.....	
I.2.1.	Selon la nature minéralogique	
I.2.2.	Selon la forme des grains	
I.2.3.	Selon les caractéristiques physiques	
I.2.4.	Selon la nature des granulats.....	
I.2.5.	Selon la dureté du granulat	
I.3.	Qualités des granulats	
I.3.1.	Analyse granulométrique	
I.3.2.	Le coefficient d'uniformité des granulats	
I.3.3.	Essai d'équivalent de sable (NF P 18.598)	
I.3.4.	Essai de propreté du gravier (NF P18-591)	
I.3.5.	Essai de fragmentation dynamique et essai Los Angeles (NF P 18-573)	
I.3.6.	Module de finesse d'un granulat.....	
I.4.	Extraction – Traitement – Fabrication des granulats	
I.4.1.	Extraction.....	

Traitement

I. LES GRANULATS

I.1. Définition – Utilisation

Définition

On appelle «granulats »les matériaux inertes, sables graviers ou cailloux, qui entrent dans la composition des bétons. C'est l'ensemble des grains compris entre 0,02 et 125 mm dont l'origine peut être naturelle, artificielle ou provenant de recyclage. Ces matériaux sont quelquefois encore appelés «agrégats ».

Exemple :

- sables
- gravillons /graviers
- granulats artificiels
- grains de polystyrène
- déchets de métallurgie
- etc...

Utilisation

Les granulats sont utilisés pour la réalisation des :

- filtres sanitaires
- filtres
- drains
- bétons
- remblais routiers
- etc...

Classification des granulats

Selon la nature minéralogique

- Roches magmatiques : - granulats de bonne qualité : exemple le granit, le quartz
- Roches sédimentaires : - non recommandés pour le béton : le calcaire
- bons granulats : exemple : le gneiss
- Roches métamorphiques : -non recommandés pour le béton : le schiste

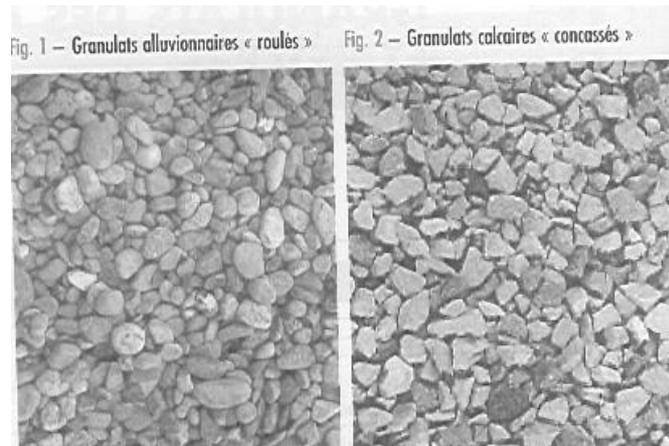
Selon la forme des grains

Elle est soit naturelle, soit artificielle.

La forme naturelle est en général roulée. Ces granulats proviennent des mers, dunes, rivières, carrières, etc...

La forme artificielle est issue du concassage de roches dures (roches mères)

Phot. 1.1. : Exemple de granulats concassés et roulés



Selon les caractéristiques physiques

La masse volumique est la masse d'un corps par unité de volume total y compris les vides entre les grains et le constituant (volume apparent).

La masse spécifique est la masse d'un corps par unité de volume de matière pleine sans aucun vide entre les grains (volume absolu).

La densité absolue est le rapport de la masse spécifique à la masse d'un égal volume d'eau à + 4 °C soit 1 000 kg ; la densité absolue est donc égale au milli ème de la masse spécifique, c'est un simple rapport sans dimension.

La densité apparente est le rapport de la masse volumique à la masse d'un égal volume d'eau à + 4 °C soit 1 000 kg. C'est donc un rapport sans dimension dont la valeur est égale au milli ème de la masse volumique.

Exemple :

Une caisse de volume total $V = 1 \text{ m}^3$ est pleine de graviers dont la masse nette est de 1 520 kg ; les grains constituant occupent un volume réel $V_s = 0,600 \text{ m}^3$ (volume de matière pleine). Le volume des vides entre les grains est :

$$V_v = V - V_s = 0,400 \text{ m}^3$$

La masse volumique de ce granulat est : 1 520 kg /m³

Sa masse spécifique est : $\frac{1520}{0.600} = 2550 \text{ kg /m}^3$

Sa densité apparente est : 1,52

Sa densité absolue est : 2,55

Compacité Pour un corps poreux (ou un mélange de granulats) de volume V et dont les pores (ou vides internes) représentent un volume

V_v , la compacité est le rapport du volume de matière pleine au volume total.

$$C = \frac{V - V_v}{V} = 1 - \frac{V_v}{V}$$

Pour les granulats courants on peut admettre que la compacité en vrac est de l'ordre de 0,70 à 0,60 pour les sables et de 0,55 pour les graviers selon qu'ils sont tassés ou non.

Porosité La porosité est le rapport : $n = \frac{V_v}{V}$

L'indice des vides est le rapport : $e = \frac{V_v}{V - V_v}$

A noter :

$$\text{On a : } \frac{V_v}{V} = \frac{V_v}{V - V_v} \times \frac{V - V_v}{V} \quad \text{Soit : } n = e.C \text{ ou encore : } e = \frac{n}{C}$$

L'indice des vides est donc le quotient de la porosité par la compacité

Exemple :

Supposons que l'on soit en présence d'un granulats alvéolaire (argile expansée par exemple). Si la masse nette d'un mètre cube de ce granulats (non tassé) est de 460 kg, on dira que sa masse volumique est de 460kg/m³ et sa densité apparente de 0,46. Si les grains occupent dans ce mètre cube un volume réel de 525 l (non compris les vides entre eux) la masse volumique par grain est :

$$\frac{460}{0.525} = 880 \text{ kg /m}^3$$

et la densité absolue des grains est de : 0,88

Si dans un grain le volume des pores ou alvéoles est de 65%, la compacité d'un grain sera (rapport du volume de matière pleine au volume totale du grain):

$$C = (1 - 65 /100) = 0,35$$

La densité absolue de la matière argileuse constituant le grain sera :

$$0,88/0,35 = 2,52.$$

C'est approximativement la masse spécifique de la matière pleine (argile) non compris pores et alvéoles.

Selon la nature des granulats

Les granulats courants

On désigne sous le vocable granulats courants, ceux de masse volumique $\in [2 ; 3 \text{ tonnes/m}^3]$. Ce sont généralement les *Basaltes, Quartzites, Grès, Porphyre, Diorite, granites, Schistes, Laitier*. Pour la composition des bétons, on utilise en général des matériaux naturels alluvionnaires : sables et graviers. Cependant, lorsque ces matériaux font défaut localement, il est possible d'utiliser des roches éruptives ou sédimentaires transformés en granulats par concassage. Silex, calcaires durs, silico-calcaires.

Les granulats lourds

Ils sont essentiellement employés pour la confection des bétons lourds utilisés pour la construction d'ouvrages nécessitant une protection biologique contre les rayonnements produits, par exemple, dans les réacteurs et piles atomiques : la protection est d'autant plus efficace que l'épaisseur est plus grande et la densité du béton plus élevée. On utilise en particulier :

- La barytine, sa densité absolue est 4,2 à 4,7
- La magnétite, sa densité absolue est 4,5 à 5,1
- Les riblons, la densité absolue est celle du fer : 7,6 à 7,8
- La grenaille d'une densité absolue de: 7,6 à 7,8

Les granulats légers

Ils sont utilisés pour la confection de bétons légers. Ces bétons présentent en général des résistances d'autant plus faibles qu'ils sont plus légers, mais cette dernière qualité peut, dans certains cas, être particulièrement intéressante (préfabrication, isolations, gain de poids sur fondations difficiles ou onéreuses, etc.) La densité absolue de ces granulats est généralement inférieure à 1.

Exemple :

Argile expansée, Schistes expansés, Laitier expansé, Pierre ponce, Pouzzolane.

Granulats très durs

Quartz, corindon, carborundum, paillettes de fonte, etc., sont incorporés au béton pour anti-usure (sols industriels par exemple).

Selon la dureté du granulat

Il s'agit de caractériser la résistance d'une face d'un granulat à la rayure, c'est-à-dire à la destruction mécanique de sa structure cristalline.

La dureté d'un granulat se juge par référence à l'échelle de dureté dite échelle de MOHS, dont les degrés sont occupés par des minéraux de dureté type. Un minéral est dit plus dur qu'un autre s'il raye celui-ci.

Dureté (échelle de MOHS)	Granulat de référence (minéral)
10	Diamant
9	Corindon
8	Topaze
7	Quartz
6	Orthose
5	Apatite
4	Fluorine

← ACIER

← VERRE

3	Calcite
2	Gypse
1	Talc

← ONGLE

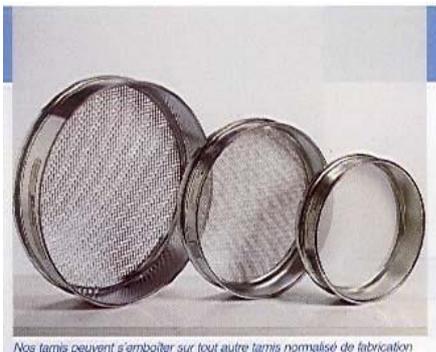
A noter :

Dans la pratique, on compare les duretés des granulats (minéraux) courants à celle de 3 matériaux types : l'acier, le verre et l'ongle

I.2. Qualité des granulats

La qualité des granulats peut être appréciée à travers divers essais de laboratoire :

Analyse granulométrique



Nos tamis peuvent s'emboîter sur tout autre tamis normalisé de fabrication

L'analyse granulométrique est le procédé par lequel on détermine la proportion des différents constituants solides d'un sol en fonction de leur grosseur à l'aide de tamis. On appelle « refus » sur un tamis le matériau qui est retenu par le tamis, et « tamisats » ou « passants » le matériau qui passe à travers les mailles d'un tamis. L'essai a pour but de déterminer les proportions pondérales des

grains de différentes dimensions qui constituent le sol. Les pourcentages ainsi obtenus sont exprimés sous forme d'un graphique appelé courbe granulométrique. Ainsi en fonction de la dimension des grains, on distingue :

- les cailloux & pierres	25 mm < D
- les gravillons grossiers	20 mm < D < 25 mm
Moyens	12,5 mm < D < 16 mm
Fins	8 mm < D < 10 mm
- les sables grossiers	2,5 mm < D < 5 mm
Moyens	0,63 μm < D < 1,25 mm
Fins	80 μm < D < 315 μm
- Les Fillers	D < 80 μm

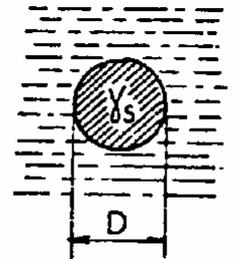


Tableau 1.1 : Définition des classes de dimensions selon la norme AFNOR 18-540

A noter :

1. En géotechnique la classification des sols et la représentation des courbes granulométriques est différente
2. 1 micron = 10^{-6} m = 10^{-3} mm

On désigne les granulats selon leur classe granulaire : le terme « Granulat d /D » est réservé aux granulats dont les dimensions s'étalent de « d » pour les petits éléments à « D » pour les gros éléments.

La classe des granulats est définie par tamisage au travers d'une série de tamis dont les mailles ont les dimensions suivantes en mm :

0.063 – 0,08 - 0.125 - 0,16 - 0,2 - 0.25 - 0,315 - 0,4 - 0.5 - 0,63 - 0,8 - 1 - 1,25 - 1,6 - 2 - 3,15 - 4 - 6,3 - 8 - 10 - 12,5 - 14 - 16 - 20 - 25 - 31.5 - 40 - 50 - 63 - 80 - 100 - 125.

A noter :

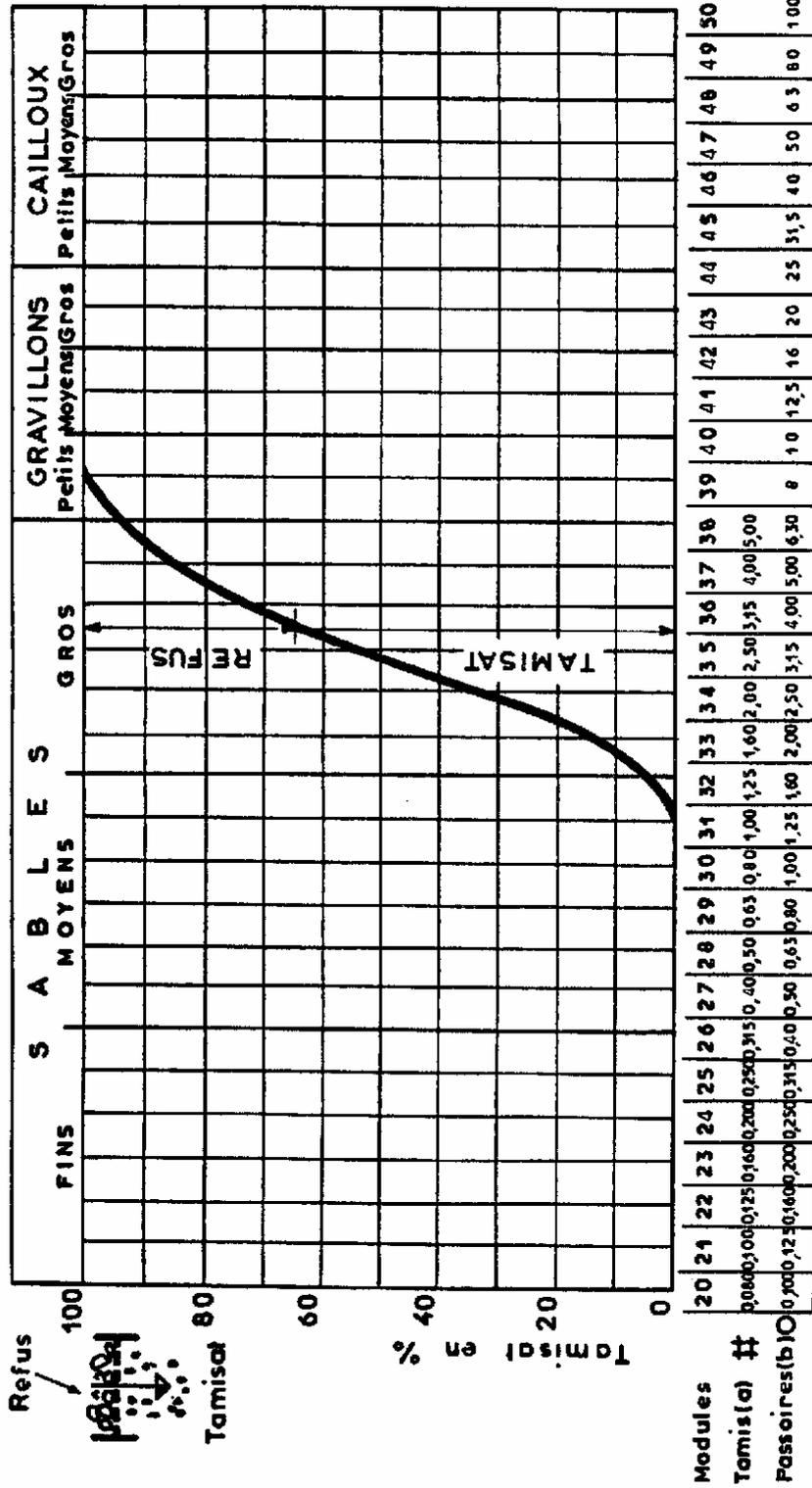
1. Les tamis dont les dimensions sont soulignées et notées en gras correspondent à la série de base préconisée. De ce fait, lors d'une étude granulométrique, ils doivent être utilisés en plus de tout autre tamis nécessaire à l'établissement de la courbe.
2. On trace la courbe granulométrique sur un graphique comportant en ordonné le pourcentage des tamisas. Les mailles D sont indiquées en abscisse selon une graduation logarithmique. La suite des valeurs de D est une progression géométrique de raison $^{10}\sqrt{10} = 1,25$
3. En géotechnique la représentation des courbes granulométriques est différente

Exemple :

Soit un matériau ayant un poids sec initial = 1 500 g.

Finissez de remplir les tableaux ci-après. Tracez la courbe granulométrique.

Tamis	Refus /partiel	Refus cumulé	Refus %	Tamisât %
5	8	80		
2,5	120	200		
1,25	380	580		
0,63	210	790		
0,315	280	1 070		
0,16	290	1 350		
0,080	90	1 450		



Module d'un tamis = $10 \log a + 1$ ex.: $10 \log 4000 + 1 = 37$ } même pouvoir tamisant
 Module d'une passoire = $10 \log b$ ex.: $10 \log 5000 = 37$
 (a et b en microns) $b \approx 1,25 a$

A partir de la courbe granulométrique on peut définir la classe granulaire du granulat utilisé
Ex. : sable 0/5 ; gravier 5/25

A noter :

- 1. Dans le cas d'un béton ou d'un mortier, le % des fines dans les sables doit être inférieur à 10%.**
- 2. Dans le cas d'un béton dont le gravier doit être 5/25, il faut éliminer tous les éléments supérieurs à 25 mm et inférieurs à 5 mm par tamisage.**

Le coefficient d'uniformité des granulats

La notion de granulométrie étalée ou granulométrie serrée est mise en évidence par un coefficient d'uniformité ou coefficient de HAZEN noté C_u :

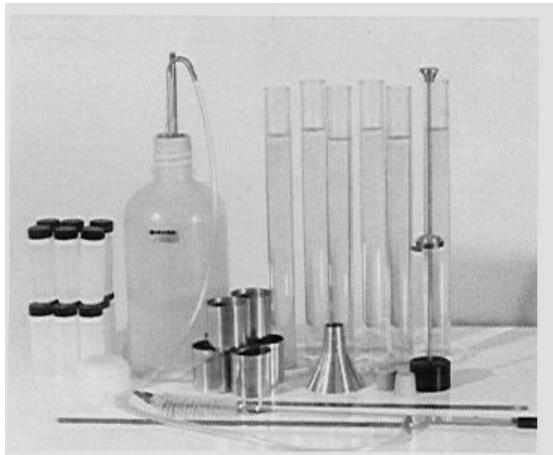
$$c_u = \frac{d_{60}}{d_{10}}$$

d_y : dimension du tamis correspondant à y% de passants.

Ce coefficient est donc immédiatement calculé à partir de la courbe granulométrique.

- si $c_u < 2$, la granulométrie est uniforme (ou serrée),
- si $c_u > 2$, la granulométrie est étalée (ou variée).

Essai d'équivalent de sable (NF P 18.598)



La propreté des sables se contrôle par l'essai d'équivalent de sable (E.S).

On agite une certaine quantité de sable dans une solution lavante (disponible dans le commerce) puis on laisse reposer pendant un certain temps.

La hauteur du dépôt de sable visible étant h_1 , et h_2 la hauteur total y compris le floculat = fines en suspension :

$$ES = 100 \times \frac{h_1}{h_2}$$

La hauteur de sable peut aussi se déterminer à l'aide d'un piston lesté que l'on dépose doucement sur le sable après avoir lu la hauteur totale.

Théoriquement les limites extrêmes des valeurs E.S seraient :

- pour sable pur (pas de floculat) $h_1 = h_2 \Rightarrow E.S = 100$
- pour argile pure (pas de dépôt de sable) $h_1 = 0 \Rightarrow E.S = 0$

Valeurs préconisées pour l'E.S :

E.S à vue	E.S piston	Nature et qualité du sable
E.S < 65	E.S < 60	<i>Sable argileux</i> : risque de retrait ou gonflement pas bon pour béton de qualité
$65 \leq E.S < 75$	$60 \leq E.S < 70$	<i>Sable légèrement argileux</i> : propreté admissible pour béton de qualité courante (retrait possible)
$75 \leq E.S < 85$	$70 \leq E.S < 80$	<i>Sable propre</i> à faible % de fines argileuses, bon pour béton de haute qualité
$E.S \geq 85$	$E.S \geq 80$	<i>Sable très propre</i> : pas de fines argileuses, ce qui risque en fait d'amener un défaut de plasticité du béton \Rightarrow augmenter le dosage d'eau ; donne des bétons exceptionnels de très haute résistance

Essai de propreté du gravier (NF P18-591)

Le gravier est composé majoritairement de particules graveleuses mais il est rarement exempt d'éléments fins. Suivant son utilisation, une trop grande quantité d'éléments fins dans le gravier entraîne des conséquences néfastes sur le béton ; par exemple (chute des caractéristiques mécaniques, grands risques de fissuration).

L'essai de propreté du gravier met en évidence la présence d'éléments fins dans le gravier et permet de les quantifier.

Cet essai est normalisé et fournit une valeur numérique prenant en compte directement de la propreté du gravier. La présente norme fixe la valeur 2% qui est le seuil de propreté acceptable du gravier, donc $p \leq 2\%$

$$\text{Le pourcentage d'impureté est} = \frac{(P_1 - P_2) * 100}{P_2}$$

, où P_1 le poids initial sec du matériau et P_2 son poids sec après lavage au tamis 0,5mm

Essai de fragmentation dynamique et essai Los Angeles (NF P 18-573)

Ces deux essais permettent de mesurer la dureté d'un échantillon de granulat.

L'essai consiste à mesurer la quantité d'éléments inférieurs à 1,6 mm produits en soumettant le matériau aux chocs d'une masse normalisée (pour la fragmentation dynamique) et aux chocs de boulets normalisés dans la machine LOS ANGELES (pour l'essai LOS ANGELES).

Si M est la masse du matériau soumis à l'essai, m la masse des éléments inférieurs à 1,6 mm produits au cours de l'essai, le coefficient s'exprime par la quantité sans dimension :

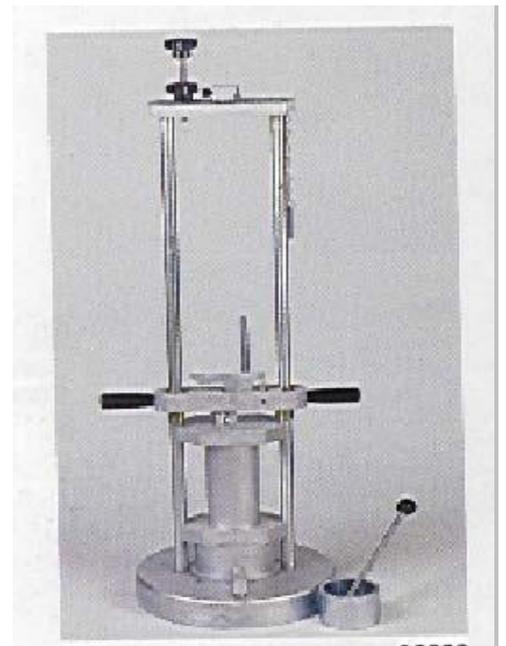
$$\frac{m * 100}{M}$$

A noter :

1. Pour éviter toute ambiguïté il faut toujours indiquer clairement s'il s'agit du coefficient de fragmentation dynamique ou du coefficient LOS ANGELES
2. Dans la pratique le coefficient est bon lorsque le résultat obtenu est inférieur à 35.



Appareil Los Angeles



Appareil de fragmentation dynamique

Module de finesse d'un granulat

Le module de finesse d'un granulat est égal au 1/100^o de la somme des refus, exprimés en pourcentage sur les différents tamis de la série suivante :

0,16 – 0,315 – 0,63 – 1,25 – 2,5 – 5 – 10 – 20 – 40 et 80 mm.

Le module de finesse étant presque exclusivement vérifié sur les sables, les tamis concernés sont : 0,16 – 0,315 – 0,63 – 1,25 – 2,5 et 5 mm

Le module de finesse est plus particulièrement appliqué aux sables dont il est une caractéristique importante.

Exemple :

Si un sable a les pourcentages de refus suivants dans les tamis correspondants ci-dessous :

D = 0,16	= 93%	}	Total somme des refus: 266
D = 0,315	= 81%		
D = 0,63	= 57%		
D = 1,25	= 27%		
D = 2,5	= 8%		
D = 5 mm	= 0		

$$\text{Son module de finesse } M_f = \frac{\sum \text{des refus cumulés} \approx 266}{100} = 2.66$$

C'est une caractéristique intéressante, surtout en ce qui concerne les sables. Un bon sable à béton doit avoir un module de finesse d'environ 2,2 à 2,8. Au-dessous, le sable a une majorité d'éléments fins et très fins, ce qui nécessite une augmentation du dosage en eau. Au-dessus, le sable manque de fines et le béton y perd en ouvrabilité.

La norme indique d'ailleurs pour les catégories A et B de sable, une limite inférieure $L_{Inf.} = 1,8$ et une limite supérieure $L_{Sup.} = 3,2$.

Des recherches sur l'influence de la finesse des sables sur les diverses qualités du béton ont conduit à délimiter certains fuseaux de granularités admissibles. (Voir courbes jointes)

La partie centrale A ($2,2 < M_f < 2,8$) convient bien pour obtenir une ouvrabilité satisfaisante et une bonne résistance avec des risques de ségrégations limités.

La partie supérieure B ($1,8 < M_f < 2,2$) est à utiliser si l'on recherche particulièrement la facilité de mise en œuvre au détriment probable de la résistance.

La partie inférieure C ($2,8 < M_f < 3,2$) correspond à des sables à utiliser pour la recherche de résistances élevées, mais on aura, en général, une moins bonne ouvrabilité et des risques de ségrégation.

Correction éventuelle du module de finesse du sable

On pourra utiliser la règle d'Abrams : supposons par exemple que l'on dispose d'un sable S_1 , de module de finesse trop fort M_{f1} et que l'on désire y ajouter un sable fin S_2 de module de finesse M_{f2} afin d'obtenir un mélange dont le module de finesse serait M_f ; les proportions des deux sables composant devront être les suivantes :

$$\text{Proportions } S_1 = \frac{M_f - M_{f2}}{M_{f1} - M_{f2}}$$

$$\text{Proportions } S_2 = \frac{M_{f1} - M_f}{M_{f1} - M_{f2}}$$

Exemple :

Soit : $M_{f1} = 3,2$ (sable grossier S_1)

$M_{f2} = 2,0$ (sable fin S_2)

$M_f = 2,5$ (sable corrigé)

$$\text{Proportion de sable } S_1 = \frac{2,5 - 2,0}{3,2 - 2,0} = 42\%$$

$$\text{Proportions de sable } S_2 = \frac{3,2 - 2,5}{3,2 - 2,0} = 58\%$$

Extraction – Traitement – Fabrication des granulats

Extraction

Les matériaux de construction (pierres naturels) sont utilisés :

- En blocs de grosseur et de tailles variables pour la confection des maçonneries,
- En petits éléments pour les bétons et les matériaux routiers,
- En éléments fins, pour les mortiers.

L'extraction se fait dans les carrières. On distingue :

- Carrières à ciel ouvert
- Carrières souterraines.

Carrières à ciel ouvert

L'exploitation en terrain meuble se fait soit manuellement, soit mécaniquement.

- L'exploitation manuelle s'effectue avec les outils suivants : Pelle, pioche, pics etc...
- L'exploitation mécanique s'effectue avec les engins de terrassements : pelles mécaniques, excavateurs, chargeurs mobiles, bulldozer, scrapers, etc...

Sur un terrain dur ou compact on utilise des explosifs pour extraire les roches qui seront concassées.

Carrières souterraines

En travaux publics on fait de moins en moins recours à l'exploitation des carrières souterraines. On peut être amené à exploiter une carrière souterraine si aucun gisement en surface n'existe dans la région.

Traitement

Concassage

Les conditions granulométriques de plus en plus précises auxquelles doivent satisfaire les matériaux constitutifs des mortiers et bétons modernes font que l'on est amené très souvent à faire subir aux produits directs de la carrière des opérations de broyage, concassage et criblage pour les amener à la grosseur désirée. On distingue 3 degrés de concassage :

- Le concassage primaire : les moellons bruts (50 à 30 cm) sont transformés en grosses pierres cassées de 10 à 6 cm de Ø. (Concasseur à mâchoires),
- Le concassage secondaire : les grosses pierres de 10 à 6 cm sont transformées en graviers de 3 à 1 cm de Ø. (Concasseur giratoire ou pendulaire),
- Le concassage tertiaire : les graviers de 3 à 1 cm sont transformés en sable de 5 mm de diamètre maximal (concasseur à cylindre).

Criblage

La classification des produits par grosseur se fait à la sortie de chaque concassage au moyen de grilles ou tamis oscillants ou tournants (trommels).

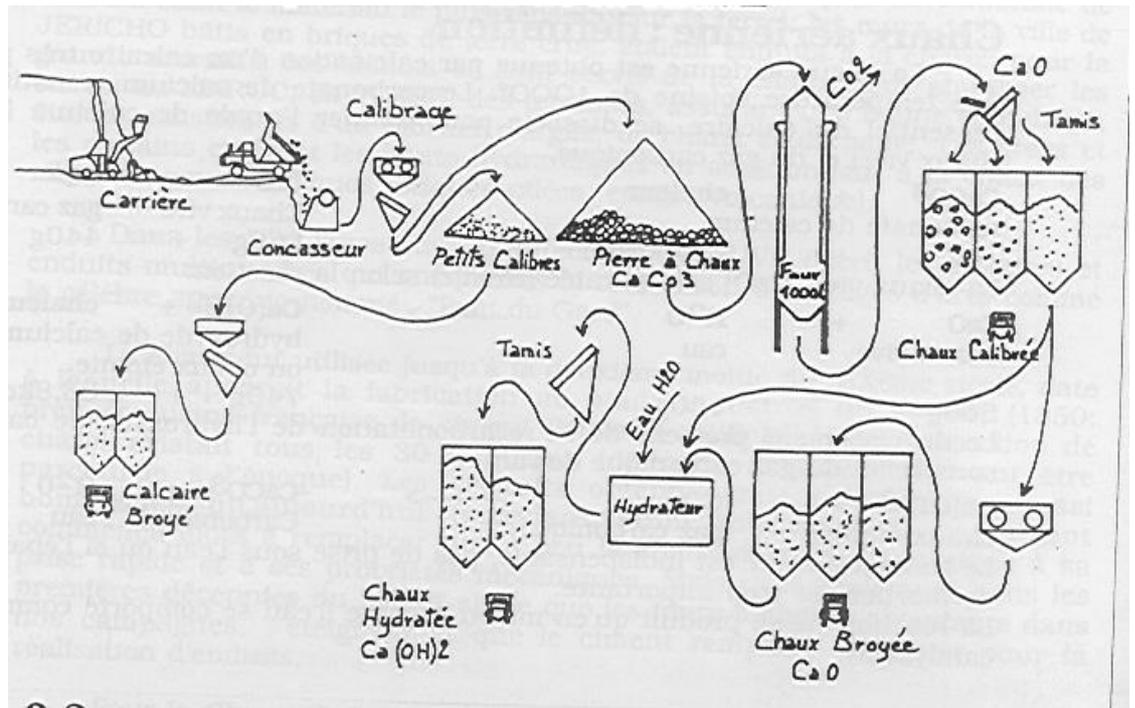
Les opérations de criblage sont complétées par celles de dépoussiérage et de lavage.

II- LES LIANTS

Les liants hydrauliques sont des poudres fines qui ont la propriété de former une pâte durcissant aussi bien à l'air que sous l'eau. Il existe deux types de liant hydraulique : la chaux et le ciment. Ces deux liants hydrauliques diffèrent de par leur mode de fabrication. Ils sont tous élaborés à partir de pierre calcaire principalement.

II.1- La chaux

La chaux est le produit de la cuisson d'un calcaire, suivi d'une extinction à l'eau.



Chaux aérienne

La chaux aérienne est obtenue par calcination d'un calcaire très pur à une température variable de 1 050 à 1 250 °C. Le carbonate de calcium constituant l'essentiel du calcaire, se dissocie pour donner l'oxyde de calcium (CaO , chaux vive) et du gaz carbonique.

Distinction entre chaux aérienne et chaux hydraulique

La Distinction entre chaux aérienne et chaux hydraulique se fait par la composition du gisement, dès que la silice est présente, une XHN est obtenue.

- La chaux aérienne ne durcit après gâchage qu'au contact de l'air (CO_2) ; on s'en sert par exemple pour le traitement des sols argileux, les badigeons de chaux ou encore certaines peintures (peinture FOAM),

- La chaux hydraulique après gâchage durcit quant elle au contact de l'air (part aérienne) et avec l'eau (part hydraulique). Il existe deux types de chaux hydraulique : les naturelles (XHN) et les artificielles (XHA)

Utilisation de la chaux dans la construction

L'utilisation de la chaux a progressivement diminué au profit du ciment même dans les secteurs où ses qualités étaient largement reconnues.

Aussi, la chaux doit retrouver une utilisation dans les domaines où son emploi est préférable, grâce à ses qualités de plasticité, d'élasticité, de perméabilité à la vapeur d'eau. Ces qualités sont particulièrement adaptées à la réalisation d'enduits et de badigeons.

Les classes de résistance associées aux chaux hydrauliques sont :

- Chaux hydraulique naturel (XHN) : 30, 60, 100 (valeurs de résistance exprimées en daN/cm², soit respectivement 3 MPa, 6 MPa et 10 MPa)
- Chaux hydraulique artificiel (XHA) : 60, 100

II.2- Le ciment

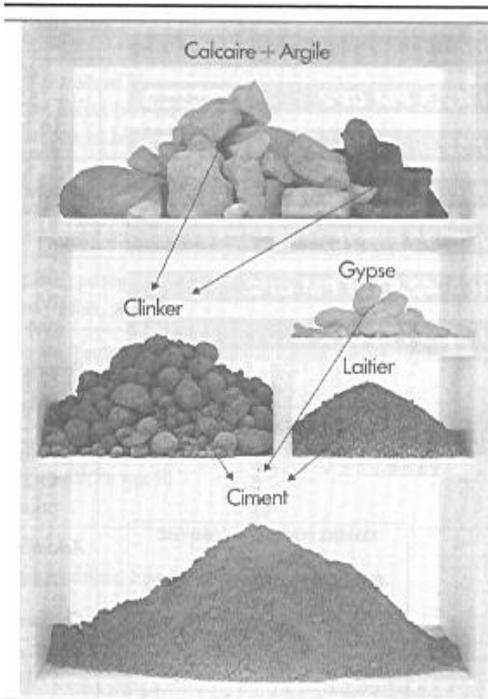
Généralités - Historique

Le ciment est un liant hydraulique (Définition : hydraulique = il durcit sous l'eau).

Les romains furent les premiers à fabriquer un véritable liant hydraulique en mélangeant de la chaux aérienne avec des cendres volcaniques du Vésuve (cendres volantes appelées Pouzzolane).

En 1756, l'anglais du nom de SHEATON mis au point un produit, capable de faire prise sous l'eau. On parla pour la première fois de ciment. Ce ciment fût fabriqué à partir de pierres de l'île de Portland. D'où l'origine du nom donné aujourd'hui au ciment (Ciment Portland).

Principe de fabrication du ciment Portland



La cuisson à 1 450°C d'un mélange composé d'environ 80 % de calcaire et 20 % d'argile, donne une roche artificielle appelée CLINKER.

C'est le constituant de base du Ciment.

Le clinker est ensuite broyé avec environ 5% de gypse pour donner du ciment Portland artificiel (C.P.A.).

Il existe 4 procédés de fabrication du ciment suivant l'état de la nature des matières premières et suivant certaines conditions économiques. La production journalière d'une usine est en moyenne égale à 2500 Tonnes.

Parmi les procédés de fabrication on peut citer :

FABRICATION DU CEMENT PAR VOIE HUMIDE

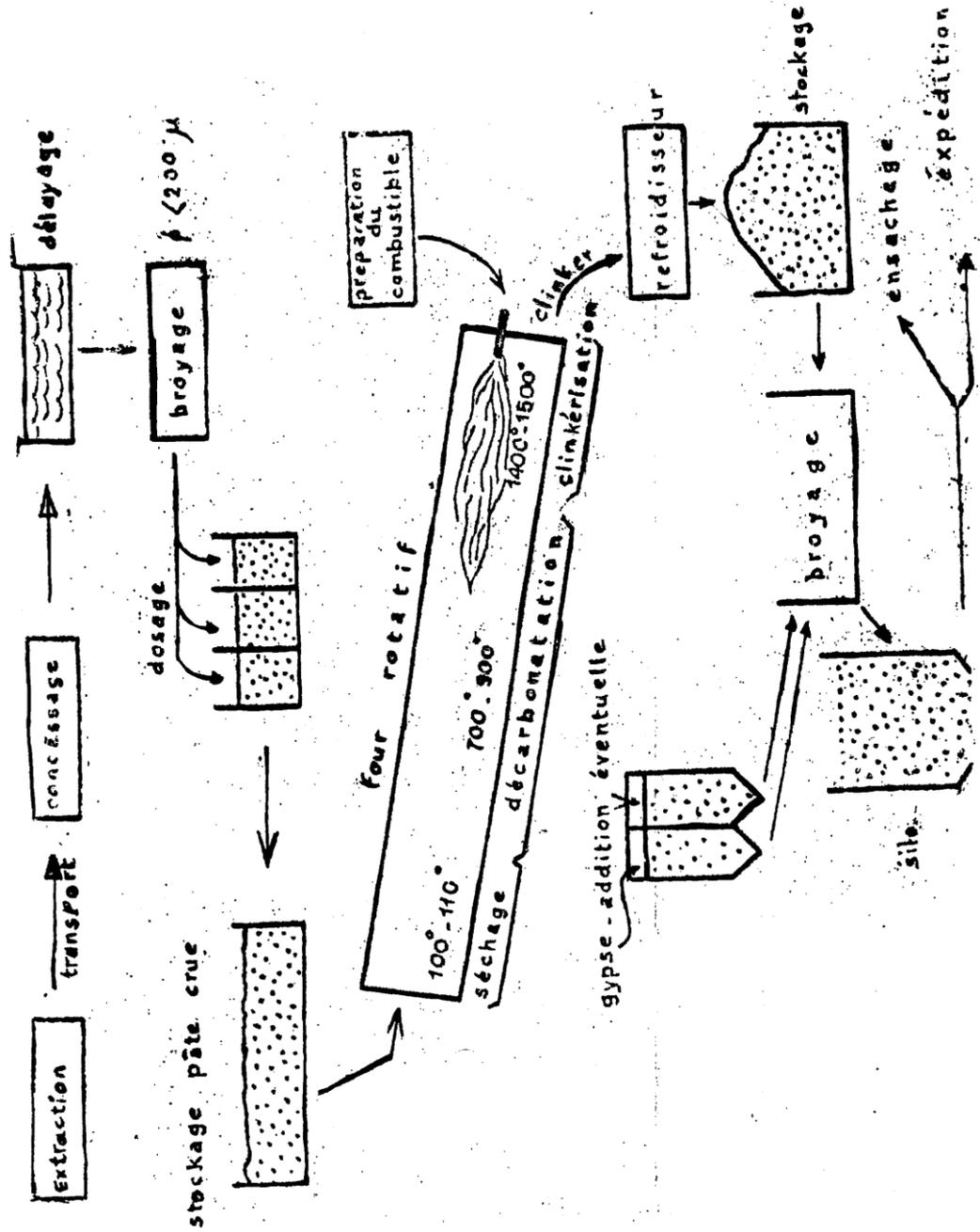


Fig. Fabrication du ciment Portland

Fabrication du ciment par voie humide et semi-humide

Après extraction en carrière et concassage des pierres, les matériaux calcaires et argileux sont traités avec de l'eau dans les délayeurs. La pâte passe ensuite sur un crible et la partie grossière passe dans un broyeur. Tous les grains ont alors un diamètre inférieur à 200 μ . Cette pâte passe ensuite dans des silos de dosage puis dans les cuves de stockage.

Voie humide

La pâte sortant des cuves de stockage alimente un four rotatif d'acier qui a une vitesse d'un tour / mn. La pâte perd son eau dans le four puis se clinkérise vers 1 450 °C. Le clinker est ensuite refroidi.

Voie semi-humide

La pâte sortant des cuves de stockage est cette fois-ci essorée sur un filtre presse. La pâte est ensuite transformée en bâtonnets de 2 cm de diamètre. Ceux-ci sont ensuite introduits sur une grille pour y subir un séchage. Les bâtonnets rentrent dans un four pour y être clinkérisés. Le clinker est ensuite refroidi.

Fabrication du ciment par voie sèche et semi-sèche

Après concassage du calcaire et séchage de l'argile, les matériaux sont ensuite déversés dans un hall appelé hall de pré-homogénéisation. Le matériau est ensuite pris en tranches et envoyé dans un broyeur sècheur. Les poudres fines obtenues sont homogénéisées dans les silos munis de fond poreux au travers duquel on souffle de l'air. La poudre est ainsi stockée.

La voie sèche

La poudre obtenue alimente un four rotatif long d'environ 150 m de long et 4 m de diamètre. Ce four est composé de deux parties. Une partie verticale appelée le pré-chauffeur où la poudre chauffée descend par gravité et une partie horizontale où la poudre est clinkérisée. Le clinker est ensuite refroidi puis stocké.

Voie semi-sèche

La poudre stockée est agglomérée sous forme de boulettes de 10 à 20 mm de diamètre à l'aide d'une assiette granulatrice. Une assiette granulatrice est un cylindre de 2 à 4 m de ϕ muni d'un fond incliné à 50%. L'assiette reçoit la poudre et de l'eau et transforme le mélange en boulette. Ces boulettes passent ensuite dans d'un four rotatif pour y être clinkérisées.

Broyage et conditionnement

Le clinker obtenu par l'un ou l'autre des procédés est stocké dans les halls puis alimente des broyeurs à boulet. Les broyeurs à boulet sont des cylindres d'acier comportant 2 ou 3 chambres de 8 à 12 m de long et de 2 à 4 m de diamètre munis intérieurement de boulets d'acier de 20 à 90 mm de diamètre.

Les broyeurs produisent environ 30 T/h. On trouve des broyeurs qui peuvent aller à 200 T/h. Au moment du broyage on ajoute 5% de gypse et éventuellement des constituants secondaires. On ajoute quelquefois des

agents de mouture. Les agents de mouture permettent d'éviter la ré-agglomération des grains déjà moulus. Ce phénomène se constate lors du broyage ainsi que lors des manipulations. Les agents de mouture facilitent le remplissage et la vidange des silos et des camions.

Après broyage le ciment est stocké dans les silos. Leur capacité varie de 1000 à 5000 tonnes d'où il sera ensuite livré en sac de 50 kg ou en vrac. Les sacs sont constitués de plusieurs feuilles de papiers kraft superposées destinées à protéger le ciment de l'humidité de l'air ambiant.

Les sacs se remplissent à l'aide d'une valve et se referment lorsque les 50 kg de ciment y ont été injectés.

Ciments avec constituants secondaires

Les ciments avec constituants secondaires renferment en plus du clinker et du gypse des produits laitiers, cendres volantes, pouzzolanes à raison de 10 à 20 % environ.

Le laitier de haut fourneau

Il est un sous-produit de la fabrication de la fonte élaboré dans les hauts fourneaux. Ce sont les résidus de la décomposition du minerai de fer. Le laitier a de nombreuses utilisations en génie civil. Celui destiné à la cimenterie subit à la sortie des hauts fourneaux une opération de trempe d'où il ressort sous forme de granulats de 1 à 5 mm de diamètre. Il est ensuite séché avant d'être broyé avec du clinker. L'opération de trempe consiste à immerger brusquement le matériau chauffé dans de l'eau.

Les cendres volantes

Elles sont des résidus de combustion de charbon dans les centrales thermiques et recueillis dans les dépoussiéreurs. Les cendres volantes se présentent sous forme de petits grains de 1 à 200 μ de diamètre.

Les pouzzolanes naturelles

Elles sont des roches d'origine volcanique principalement. Elles contiennent des éléments chimiques du clinker à l'état naturel appelés propriétés pouzzolaniques.

Pouzzolanes artificielles

Certains matériaux tels que les argiles et les schistes peuvent après chauffage jusqu'à une certaine température développer des propriétés analogues aux pouzzolanes naturelles. On les appelle pouzzolanes artificielles.

Les Fillers

Roches calcaires ou siliceuses broyées à une finesse élevée (grain de diamètre inférieurs à 50 micron ; on parle parfois de même de « fumée de silice » pour certains Fillers). Les fillers en générale améliorent considérablement la résistance.

fabrication des autres liants hydrauliques

Il existe d'autres types de liants qui diffèrent du C.P.A. La différence se trouve soit par les éléments naturels servant à leur fabrication, soit par

leur mode de cuisson, soit par la variation en % des différents constituants au moment du broyage.

Classification des liants hydrauliques

Dans la plupart des pays africains francophones et à défaut de normes propres, la classification utilisée est la classification française.

Il existe deux classifications :

- L'ancienne classification (CPA 45, CPJ 35, ..),
- La nouvelle classification (CEM I 32,5, CEM II 42,5, ..).

Les liants normalisés sont donc conformes aux normes AFNOR P 15.300 et 301 de janvier 1979. La norme distingue les ciments d'après :

- Leur classe de résistance
- Leur composition

Mesure des résistances – Classe de résistance

Les résistances sont mesurées sur un mortier 1/3 de composition pondérale (poids) suivante :

- Ciment : 1
- Sable : 3 (granulométrie 0,1/1,6 - sable normalisé de la ville de Fontainebleau ; France)
- Eau : 0,5 (rapport E/C = 0,5 du même ordre de grandeur que celui d'un béton classique).

A noter :

1. Des sables du Sénégal ont été essayés et une corrélation existerait entre les résultats obtenus. Un projet de normalisation ORAN serait en cours.
2. Ce mortier s'appelle le **mortier Normalisé**. Sa confection doit être réalisée selon un processus et avec un appareillage normalisé (malaxeur, moule, etc...).

Des éprouvettes de 4x4x16 cm (3 par âge) sont confectionnées suivant un processus normalisé (malaxage, mise en place à la table à chocs) et conservées 24h en armoire humide puis démoulées avant d'être conservées dans l'eau à 20°C.

Rupture en 2 par traction-flexion sous charge centrale concentrée puis par compression sur les 2 demi prismes obtenus. La classe de résistance est la résistance en compression (moyenne de 6 valeur) à 28 jours exprimée en MégaPascal ($1 \text{ MPa} = 10 \text{ daN/cm}^2 = 10 \text{ bar} = 1 \text{ N/mm}^2$).

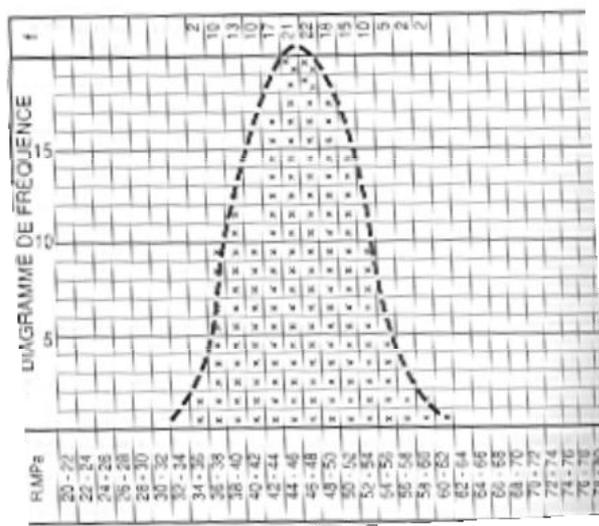
Il existe ainsi 4 classes principales : **35 , 45, 55 et HP** (HP pour «Haute Performance»).

Il existe des sous classes R (pour les ciments rapides et contrôlés pour leurs part à 2 jours). On retrouve donc par ailleurs les sous-classes : **45R 55R et HPR**.

A noter :

1. Les résistances sont garanties en Afrique à défaut par les seuls auto-contrôles des fabricants (interprétation statistique des résultats de résistance).
2. Les ciments de certains fabricants se sont révélés par le passé de mauvais ciment en particulier parce qu'il était fabriqué à partir de gypse contenant des traces de bitume.
3. L'interprétation statistique des résultats de résistance repose sur le principe suivant :
 - 99 % des résultats sont supérieurs à 1 limite inférieure nominale,
 - 90 % des résultats d'essai à 28 jours sont inférieurs à 1 limite supérieure nominale. Et la moyenne de ces deux limites est retenue pour désigner la classe de résistance exprimée en méga Pascal. Pour les sous classes (R=rapide), dans ce cas 90 % des résultats à 2 jours devront être à une limite inférieure nominale.

Fig. Courbe statistique des essais



Classe	Sous classe	R é s i s t a n c e à l a c o m p r e s s i o n e n M p a		
		à 2 jours		à 28 jours
		Limite inf é r i e u r e n o m i n a l e	Limite inf é r i e u r e n o m i n a l e	Limite sup é r i e u r e n o m i n a l e
CPA 35	-	-	25,0	45,0
CPA 45	-	-	35,0	55,0
CPA 45 R	R	15,0	35,0	55,0
CPA 55	-	-	45,0	65,0
CPA 55 R	R	22,5	45,0	65,0
T.H.R. (Tr è s H a u t e R é s i s t a n c e)	-	30,0	55,0	-

Tab. Valeurs limites selon les classes de r é s i s t a n c e s

Les diff é r e n t s c i m e n t s n o r m a l i s é s - C o m p o s i t i o n

Il existe 5 familles de produits (associables aux diff é r e n t e s c l a s s e s d e r é s i s t a n c e). Dans les pourcentages suivant le Gypse n'est pas donné (il est en plus) :

- Le **CPA** contenant au moins 97% de clinker (et donc moins de 3 % de filler)
- Le **CPJ** contennt au moins 65 % de clinker (j pour ajout : laitier, cendre, pouzzolae, filler)
- Le **CLC** contenant de 25 0 60 % de clinker et de 20 à 45 % de cendres ou de laitier (Ciment au Laitier et aux Cendres)
- Le **CHF** contenant de 40 à 75 % de laitier
- Le **CLK** contenant plus de 80 % de laitier

Les ciments les plus utilis é s en Afrique sont les CPJ 35 et CPA 45.

Utilisation des ciments

CPJ 35 :

Peut être utilis é en maçonnerie, en b é t o n c o u r a n t (non arm é ou arm é), fondation, poutre de petite portée, poteau. Mais il faut dire qu'en fait **son domaine d'emploi privil é g i é r e s t l e s e n d u i t s, m o r t i e r e t c h a p e**. Ce n'est pas un ciment de structure.

Le CPJ 35 peut être aussi utilis é pour les blocs pr é f a b r i q u é s en mortier ou en b é t o n non arm é Ex : agglom é r é s, hourdis (corps creux). Le CPJ 35 peut être utilis é pour la stabilisation des sols (grave ciment). Il peut être é g a l e m e n t utilis é pour les travaux en grande masse peu sollicit é en traction. Ex : barrage.

CPA 45 :

Pour BA sollicité (poteau, poutre, dalle) ; c'est le ciment de structure courant :

- Béton armé
- Béton précontraint,
- Dallage industriel,
- Béton routier,
- Ouvrage de génie civil

CPA 55 R

BA très **fortement sollicité** (ossature porteuse) et avec **prise rapide**:

- BA avec décoffrage rapide.
- Eléments préfabriqués en BA (poutre, poutrelle, pré-dalle).
- Béton précontraint.

Les CHF et CLK sont surtout destinés aux fondations, aux travaux souterrains, **milieux agressif, travaux en grande masse**, travaux d'injection.

Les autres ciments. On peut citer :

- Les **ciments alumineux** (ciment réfractaire à 40 % d'alumine), résistant aux milieux agressifs ; attention dégagement en séchant une très grande quantité de chaleur ; prise normale mais durcissement très rapide ; de couleur gris très foncé ; recommandé en milieu froid ; ciment difficile à utiliser,
- **Ciment Prompt** prise très rapide ; prend en quelques minutes ; utilisé pour le scellement et réparation, ou encore en à la projection (par voie sèche, pour construction de tunnel, talus de soutènement, ect ..); de couleur jaunâtre
- **Ciment blanc** (souvent CPA 55 et R)
- **Ciment prise mer**
- **Ciment pour eaux sulfatées**
- **Ciment expansif** ou encore à retrait compensé
- **Ciment réfractaire** (résiste jusqu'à 2 000°C) ; attention au choix des granulats pour les bétons fabriqués avec ces ciments (eux aussi devant être nécessairement réfractaire); ce sont en générale des ciments alumineux (forte teneur en alumine, de 50 à 80%)

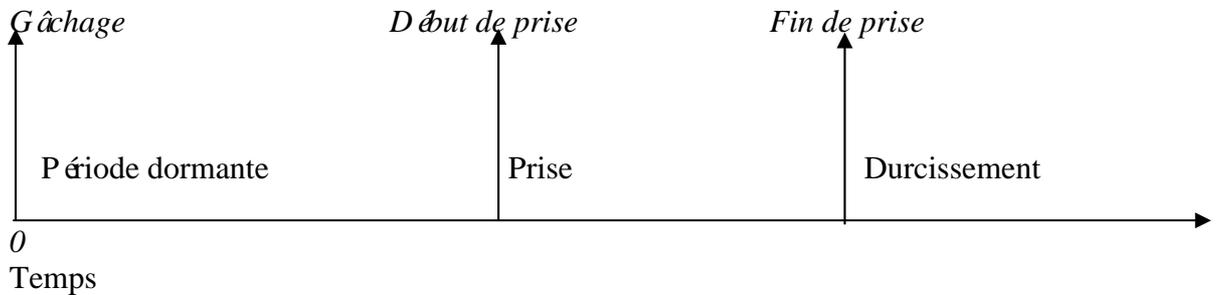
A noter :

La norme NF P 15. 010 de 1985 est le guide d'utilisation des ciments normalisés selon les ouvrages. En pratique pour tout ouvrage particulier, consulter le fabricant.

Prise et durcissement :

Lorsqu'on réalise un gâché de pâte de ciment, de mortier ou de béton, on constate après un certain temps un raidissement du produit : c'est le début de prise.

Ce raidissement s'accroît jusqu'à ce que le produit obtienne une résistance appréciable en fin de prise.



Les réactions qui se passent dès le début du gâchage et qui se poursuivent dans le temps sont complexes. Il se produit une micro-cristallisation. La multiplication de ces cristaux dans le temps explique l'augmentation de résistance mécanique.

Les temps de début de prise peuvent varier de quelques minutes (ciment prompt) à quelques heures (CPA).. Le temps de début de prise se caractérise :

- Par une augmentation assez brusque de la cohésion, du seuil de cisaillement
- Par une élévation de la température

Ensuite la courbe d'évolution des résistances est continue dans le temps. Le durcissement total (résistance maximale) peut durer plusieurs années. On repère le début de cette courbe par la résistance à la fin de prise (repère technologique).

Le début de prise est normalisé : essai sur pâte pure de consistance normale à l'aide de l'aiguille de VICAT de 1 mm² de section et de 300 g

.Un essai préalable permet de déterminer la teneur en eau nécessaire à l'essai, compte tenu du fait que la teneur en eau fait évoluer le temps de prise (valeur souvent comprise entre 24 et 26% \Leftrightarrow à la quantité d'eau juste nécessaire pour l'hydratation du ciment). Le début de prise est l'instant où l'aiguille n'arrive plus au fond de la coupelle.

La fin de prise n'est pas normalisée : c'est l'instant où l'aiguille ne laisse plus de trace à la surface de la pâte.

Le temps de prise à 20 °C pour les ciments courants normalisés sont compris :

- Entre 2h30 et 4h30 pour le début de prise
- Entre 4h30 et 7h30 pour la fin de prise

Les ciments normalisés doivent avoir une vitesse de début de prise supérieure à :

- 1 heure pour les classes 55 et HP
- 1 heure 30 minutes pour les classes inférieures (35 et 45).

Le temps de prise pour les mortiers et bétons augmente avec :

- L'ajout de constituant secondaire
- L'éventement du ciment
- Plus le ciment est broyé finement plus la prise est rapide ; c'est ce qui différencie principalement un CPA45 et un CPA45R par exemple,
- L'eau : quantité, qualité
- Sable (propreté)
- Adjuvants : accélérateurs et retardateur
- Humidité de l'air (prise un peu plus lente dans l'eau)
- Température (prise très retardée par temps froid)

A noter : La température est le paramètre important

Les adjuvants

Ce sont des produits liquides ou en poudre que l'on ajoute en petite quantité dans les gâchées de béton et qui sont destinées à leur conférer des propriétés particulières. Parmi les adjuvants il y en a qui agissent sur la prise :

- Les accélérateurs de prise,
- Les retardateurs de prise.

Les accélérateurs de prise sont utilisés lorsqu'on est astreint à des délais de décoffrage très courts ou lorsque l'on bétonne en temps froid (5 à 10 °C). Les retardateurs de prise sont utilisés lorsque l'on bétonne par temps chaud ou pour éviter les reprises de bétonnage.

Il existe aussi des adjuvants pour rendre les bétons étanches (béton hydrofuge) ou encore résistant au gel, etc

Les principaux essais sur les ciments

a. Masse volumique apparente

$$\text{Masse volumique apparente} = \frac{\text{masse}}{\text{volume apparent}}$$

C'est la masse par unité de volume, c'est à dire le volume occupé par les grains et les vides.

b. Densité apparente

La densité apparente est un nombre sans dimension. C'est le rapport de

la masse volumique apparente considéré à celle de l'eau pure à $4^{\circ}\text{C} = 1\text{g/cm}^3$. La densité apparente varie avec le degré de tassement du ciment. Pour cela, on utilisera un appareil permettant d'avoir un tassement identique lors de tous les essais. Il s'agit d'un entonnoir muni d'une passoire qui limite la hauteur de chute du ciment dans un litre taré :

- Remplissage du litre,
- Araser la surface du litre à l'aide d'une règle,
- Peser l'ensemble (litre + ciment) connaissant le poids du litre, déduire le poids du ciment.

La densité apparente D_a est alors : $D_a = \frac{\text{masse du ciment}}{\text{volume du récipient}}$



Fig. Appareil pour densité apparente

La valeur moyenne de la densité apparente D_a est 1g/cm^3 ($D_a = 1$).

c. Masse volumique absolue ou poids spécifique

Elle est la masse de l'unité de volume absolu c'est à dire le volume occupé par les grains seuls. On parle aussi de poids spécifique. La méthode de mesure du poids spécifique ou masse volumique absolue est la même qu'il s'agisse d'un ciment, d'un gravier ou d'un sable. Le ciment est pesé et son volume est déterminé par déplacement d'un liquide. Avec le ciment on utilise un liquide qui ne réagit pas lui, et qui a un faible coefficient de dilatation (Benzène - CCl_4).

Mesure au volumétre de Châtelier

On utilise un petit ballon de verre surmonté d'un bouchon rodé muni d'un tube capillaire avec un repère de remplissage.

Remplir l'appareil de CCl_4 jusqu'à ce que le niveau parvienne entre les divisions 0 et 1.

Immerger le volumétre dans un récipient contenant de l'eau à $20^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$.

Pendant l'équilibrage des températures, peser 64 g de ciment dans un bêcher (à 0,1 g près).

Repérer exactement le niveau atteint : N_0



Verser le ciment très lentement (en ¼ d'heure environ) dans l'appareil, en prenant garde à ne pas laisser de dépôt sur les parois.

Boucher le volumétre, l'incliner à 45° par rapport à la table et le faire rouler avec un mouvement de va et vient de manière à faciliter le départ de l'air.

Replacer l'appareil dans le bain et lire le niveau N_2 du CCL_4 après équilibre de température. La masse volumique absolue du ciment exprimée en g/cm^3 est donnée par le rapport :

$$\gamma = \frac{\text{Poids de ciment (en g)}}{\text{volume absolu du ciment (en g)}} = \frac{64}{N_2 - N_1}$$

A noter : La masse volumique est comprise entre 2,90 et 3,20 g/cm^3 suivant la nature du ciment

d. Analyse granulométrique du ciment

Elle consiste à déterminer la répartition en poids des grains suivant leur dimension. Les dimensions des grains de ciment varient de 1 à 200 microns. On peut utiliser pour les plus gros un tamisage aidé par aspiration c'est à dire les ϕ de 40 à 200 μ .

Pour les $\phi < 40 \mu$ on utilise le principe de la vitesse de sédimentation des grains dans un fluide.

Ce principe dit que la vitesse de sédimentation des grains est proportionnelle au carré de leur taille

$$V = k \times d^2 \text{ (loi de Stokes)}$$

On utilise comme fluide soit l'alcool, soit l'air .

- L'essai avec l'air est la FLOUROMETRIE
- L'essai avec l'alcool est celui de ANDEASEN

e. Surface spécifique du ciment

La surface spécifique est mesurée le plus souvent avec le perméabilimètre de BLAINE.

Principes :

On mesure la perméabilité d'une couche de ciment tassée dont la porosité est connue = 0,5. On crée une dépression grâce à un tube manométrique et on mesure le temps de descente du liquide entre deux repères.

La perméabilité étant liée à la surface spécifique des grains, on peut donc la calculer à l'aide du temps (t) relevé grâce à la formule ci-dessus. Les valeurs courantes des S_s sont :



La surface spécifique des ciments est comprise entre 2 500 et 4 500 cm²/g.

Les principaux essais sur les pâtes de ciment

a. Détermination du pourcentage d'eau normale (Essai de consistance)

Il s'agit de déterminer la quantité d'eau à ajouter à un poids de ciment pour obtenir une pâte dite normale.

Cette quantité d'eau est la quantité jugée nécessaire pour l'hydratation complète du ciment. Cet essai dit essai de consistance est réalisé à l'aide de l'appareil de VICAT. Pour réaliser l'essai de consistance, l'appareil de VICAT est muni d'une sonde dite de VICAT. La sonde de VICAT a 10 mm de diamètre. Elle est laissée sans vitesse initiale depuis la surface d'un moulage de pâte de 40 mm de haut. Elle s'enfonce sous son propre poids pour s'arrêter à une distance d du fond.

La pâte est dite normale lorsque la sonde

s'arrête à 6 ± 1 mm du fond. Cette détermination est faite par tâtonnement. Et on exprime le

$$\text{résultat sous le rapport } \frac{E}{C}$$

La pâte est réalisée selon un processus et avec les appareils normalisés. La pâte normale est utilisée pour l'essai de prise.

b. Essai de prise

Les fins et débuts de prise sont mesurés sur pâte normale à l'aide de l'appareil de VICAT muni d'une aiguille de VICAT dont la section = 1 mm². On remplit en général deux moules tronconiques de pâte normale que l'on conserve dans l'eau pendant toute la durée de l'essai. A intervalle de temps réguliers on laisse descendre l'aiguille dans la pâte début de la surface sans vitesse initiale. On constate au bout d'un certain temps que l'aiguille ne descend plus jusqu'au fond du moule. Le temps de début de prise est l'instant où l'aiguille ne s'arrête plus qu'à 2,5 mm du fond du moule. Le temps 0 étant pris égal à l'instant où le liant est mis en contact avec l'eau. Le temps de début de prise est normalisé (NFP 15-431).

Le temps de fin de prise n'est pas normalisé. Mais on considère en général que c'est l'instant où l'aiguille ne laisse plus de trace à la surface de la pâte.



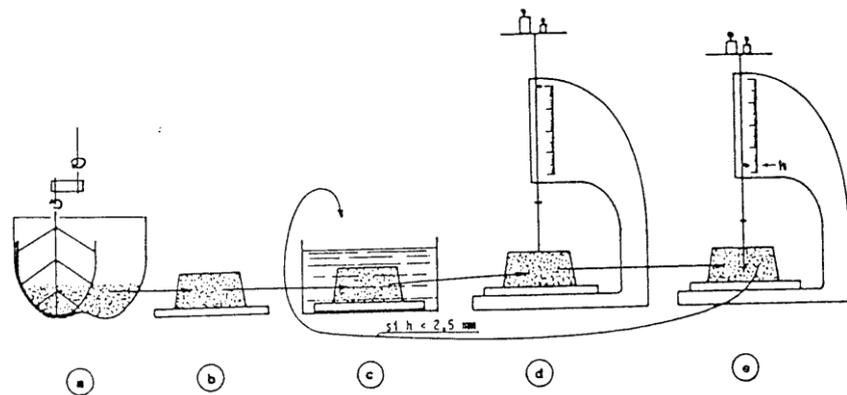


Fig. 38.

c. Essai de retrait et de gonflement

Les essais sont réalisés sur les prismes $4 \times 4 \times 16$ de mortier normal munis à leur extrémité de plots de mesures noyés dans le mortier.

On étudie dans le temps, c'est à dire à 7 jours et à 28 jours après la confection, le retrait à l'air et le gonflement dans l'eau. Le retrait à l'air est mesuré à 20°C avec une humidité relative de 50 %. Le gonflement à l'eau est mesuré à 5°C , les variations de dimensions sont mesurées à l'aide d'un appareil appelé retractomètre. Le retractomètre est capable d'enregistrer une variation de longueur de 5 microns.

La nouvelle normalisation indique que les retraits à 28 jours mesurés sur mortier normal ne doit pas dépasser :

- 800 μ par mètre pour les ciments de classe 35 et 45
- 1 000 μ par mètre pour les ciments de classe 45 R et 55

Elle indique également que le gonflement à 28 jours ne doit pas dépasser 250 μ / m .

d. Essai de flexion et de compression

Cet essai est réalisé sur mortier normal. On confectionne des séries de 3 prismes (ou éprouvettes prismatiques $4 \times 4 \times 16$) qui sont conservées dans l'eau jusqu'à la période des essais.

Ces prismes sont d'abord rompues en traction par flexion. Sous l'effet d'une charge concentrée appliquée au milieu de la portée. Les deux morceaux obtenus sont ensuite écrasés en compression sous une presse et sur une surface de 16 cm^2 . On obtient ainsi pour une éprouvette donnée, un résultat en traction par flexion et deux résultats en compression.

L'essai de compression permet de déterminer la classe de résistance du ciment. On réalise un essai de traction par flexion car l'essai de traction directe est difficile à réaliser.