Constituants des bétons et leurs propriétés

I. Les liants

1. Définition

Les liants sont des produits généralement employés sous forme de poudres fines, ce sont des produits utilisés pour ***lier*** ou agglomérer entre eux d'autres matériaux.

On a comme liants : les liants minéraux et les liants organiques.

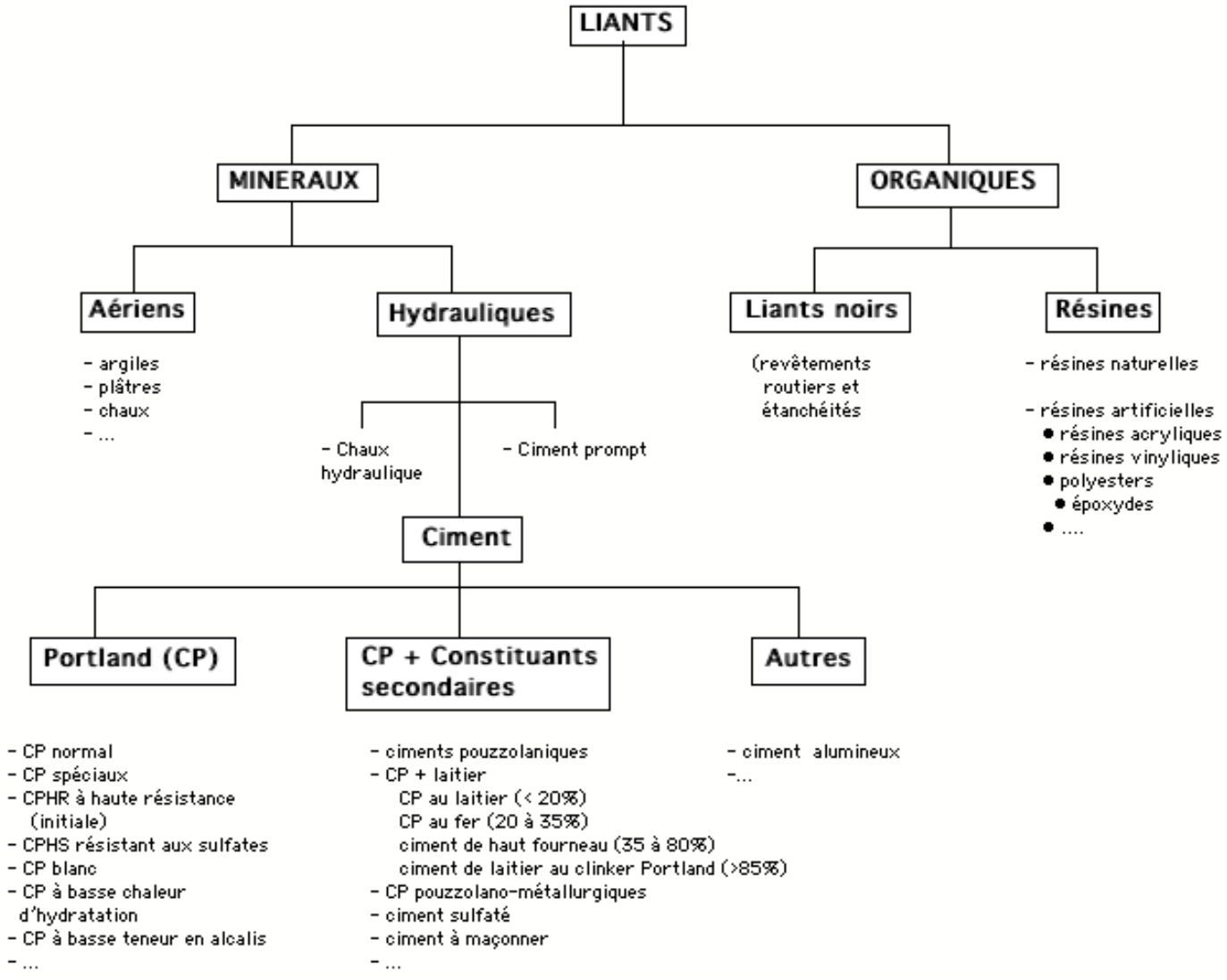


Figure 1 : Organigramme des liants

2. Classification

On classe les liants minéraux en deux types :

2.a- les liants hydrauliques :

Ce sont les matières qui peuvent durcir et se conserver pendant une longue durée, qui résistent non seulement à l'air mais aussi à l'eau. Citons parmi ceux-ci : le ciment portland, la chaux hydraulique.

2.b- les liants aériens :

On appelle liants aériens les matières qui peuvent passer à l'état solide, se conserver pendant une longue durée et augmenter la résistance à l'air libre. Nommons ici: le plâtre, la chaux aérienne.

3. Les liants hydrauliques

3.1. Le ciment

3.1.1. Définitions

Le ciment est une matière inorganique finement moulue, on gâchant avec de l'eau forme une pâte qui fait prise et après ce durcit. La réaction chimique (hydratation) entre la poudre de ciment et l'eau produit un minéral artificiel insoluble. Plus les grains de ciment sont fins, plus cette réaction s'opère rapidement.

Après durcissement, cette pâte conserve sa résistance et sa stabilité, même sous l'eau. Le ciment est un constituant de base du béton.

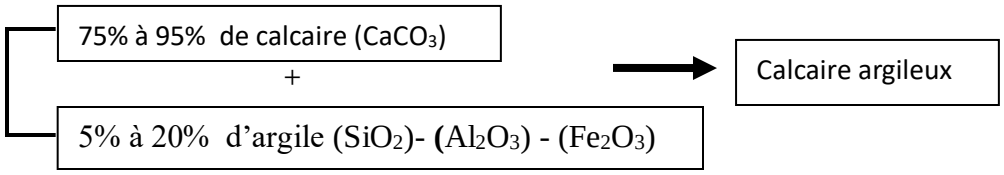
3.1.2. Les constituants du ciment

Minéralogiquement parlant, le ciment est fait essentiellement à partir de quatre constituants :

- **la chaux CaO** (désignation simplifiée « C ») plutôt basique ;
- **la silice SiO_2** (désignation simplifiée « S ») ;
- **l'alumine Al_2O_3** (désignation simplifiée « A ») ;
- **l'oxyde de fer Fe_2O_3** (désignation simplifiée « F ») plutôt acide.

■ Ces quatre éléments de base ne se trouvent pas dans la nature dans des états adéquats favorisant l'émergence des liants hydrauliques. En effet, la chaux CaO se carbonate facilement en absorbant le gaz carbonique de l'air, pour devenir de la roche calcaire, en abondance dans la nature. Les trois oxydes **(SiO_2, Al_2O_3, Fe_2O_3)** abondent dans la nature sous forme cristallisée et stable (sable, argiles, etc.). Après une soigneuse sélection ils doivent donc subir un traitement approprié pour les amener dans un état de réactivité. Sans ce traitement, rien ne se passe ou, au mieux, peu de choses.

- **Matières premières**



- En fait, **pour que la réactivité du mélange soit effective**, **il faut que les quatre ingrédients de base aient subi un traitement thermique**.

  Le calcaire $CaCO_3$ se décarbonate à environ 900°C pour donner de la chaux vive CaO, matière réactive ; les trois oxydes perdront leurs structures cristallines stables vers **1450°C** au profit de structures amorphes plutôt réactives.

- Pratiquement parlant, le **ciment portland artificiel** résulte :
  - de la cuisson à **1450°C** d'un mélange de calcaire $CaCO_3$ (source de CaO) et d'argile (source de SiO_2- Al_2O_3 - Fe_2O_3), qui donne ce que l'on appelle le « ***clinker*** » ;
  - du broyage du *clinker* afin d'obtenir une poudre très fine et réactive.

On peut aussi fabriquer des ciments en effectuant des mélanges en proportions diverses de :

C***linker*** – **Laitier** (déchets de fabrication de la fonte haut-fourneau) – **Cendres volantes** (résidus issues de la combustion des charbons schisteux brûlés en centrales thermiques)

3.1.3. La fabrication du ciment

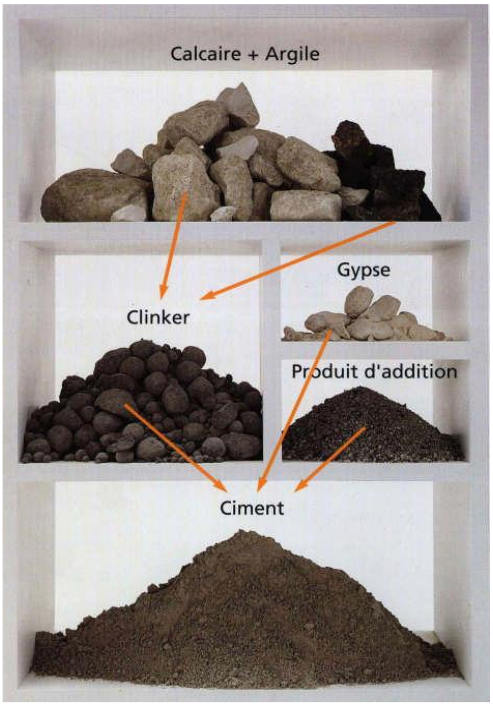
Les différentes étapes de la fabrication du ciment sont les suivantes (figure 2):

a. Extraction et concassage :

Les matières premières sont extraites de carrières

b. Préparation de la matière première:

Les grains de calcaire et d'argile sont intimement mélangés par broyage qui peut être effectué en incorporant de faible proportion de bauxite et oxyde de fer. Le mélange **cru** est préparé automatiquement sous forme de granules **(voie sèche ou semi-sèche)** selon la technique de fabrication utilisée.



c. Cuisson :

Quelle que soit la technique de fabrication utilisée pour élaborer le cru, les installations de cuisson sont similaires.

d. Broyage :

A la fin de la cuisson, la matière brusquement refroidie (70°C) se présente sous forme de granules qui constituent le clinker. Celui-ci finement broyé avec du gypse (< 5 %) pour régulariser la prise donne le ciment Portland.

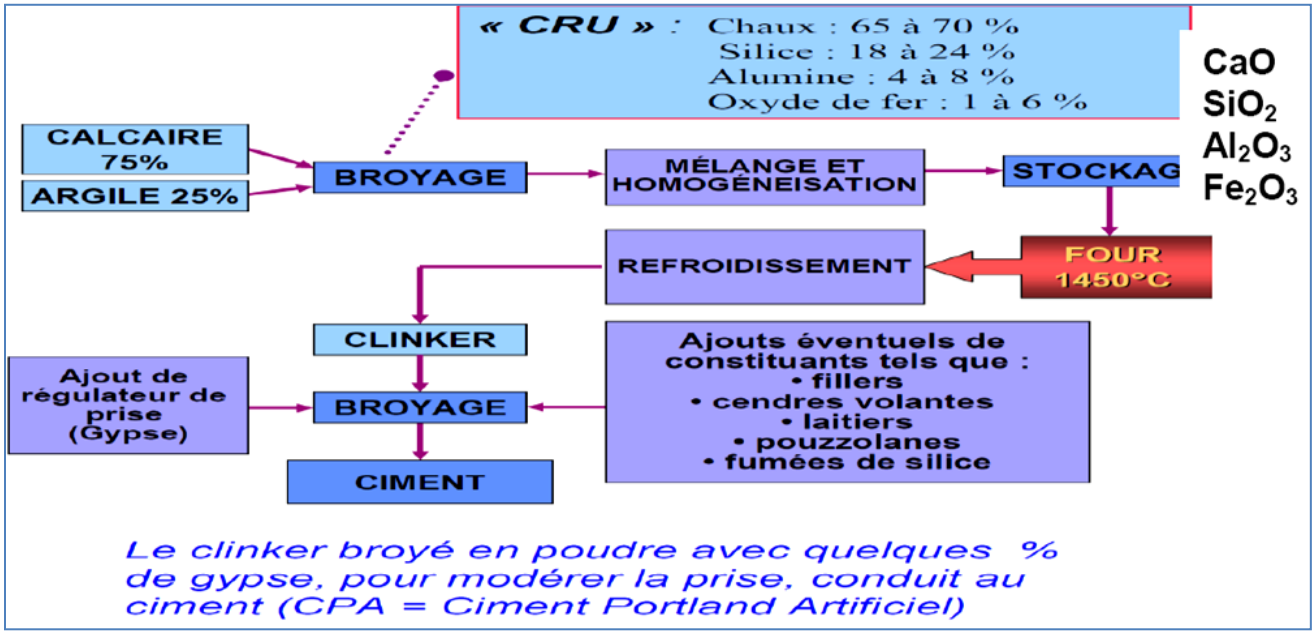


Figure 2: Organigramme de fabrication du ciment

- **Constituants du ciment portland**

Le ciment = Argile + Calcaire

SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3 + CaO

La silice L'alumine L'oxyde de fer + La chaux

Les oxydes

I.3.1 Constituants du clinker

Les principaux composants anhydres obtenus lors du refroidissement rapide du clinker sont:

- Le silicate tricalcique **$3CaO.SiO_2$** (C_3S) .
- Le silicate bicalcique **$2CaO.SiO_2$** (C_2S)
- L'aluminate tricalcique $3CaO.Al.O_3$ (C_3A)
- L'alumino-ferrite tétracalcique (Ferro-aluminate tetracalique) **$4CaOAl_2O_3.Fe_2O_3$** (C_4AF)

I.3.2 L'hydratation du ciment

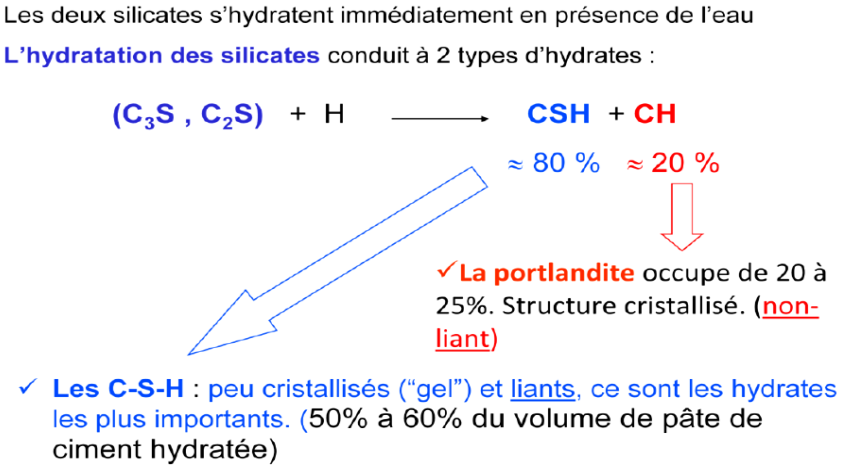
L'hydratation du ciment est la réaction chimique entre l'eau et le ciment qui donne comme résultat la pâte de ciment hydratée. Il s'agit des séquences réactionnelles des principaux composés du ciment avec une dominance pour le C_3S et le C_3A à court terme.

Le C_3S est la phase la plus importante du ciment. La chaleur dégagée par cette phase est l'une des plus élevée. La majeure partie de son hydratation se passe dans les 28 premiers jours. La réaction complète peut prendre jusqu'à une (1) année.

La vitesse d'hydratation de C_2S est beaucoup plus faible que celle du C_3S. Le C_2S va surtout participer au développement des résistances après 28 jours et dégage une très faible chaleur.

Les produits d'hydratation sont le silicate de calcium hydraté (C-S-H) et l'hydroxyde de calcium ou portlandite.

❖ ***Hydratation des silicates C2S et C3S***



❖ ***Hydratation des Aluminates C3A et C4AF***

- L'hydratation de l'aluminate tricalcique C_3A est très rapide et violente surtout en absence des sulfates et donne des aluminates hydratés qui bloquent l'hydratation des autres composants et résultent un mauvais béton, ce qui mène à utiliser le gypse comme régulateur de prise.

$$3\,CaSO_4 + 3CaO\,Al_2O_3 + 32\,H_2O \longrightarrow 3CaO\,Al_2O_3.3\,CaSO_4.\,32\,H_2O$$

Gypse **C_3A** **Ettringite = sel de Candlot**

- L'alumino ferrite tétracalcique (C_4AF): Il possède une séquence réactionnelle proche de celle de C_3A avec une vitesse plus faible et il dégage peu de chaleur et participe peu au développement de la résistance.

• Les mécanismes d'hydratation du ciment transforment un milieu fluide en un corps solide, par développement de la microstructure car la porosité de pâte diminue au fur et à mesure de l'avancement des réactions d'hydratation, ce qui développe les performances mécaniques, en particulier la résistance en compression.

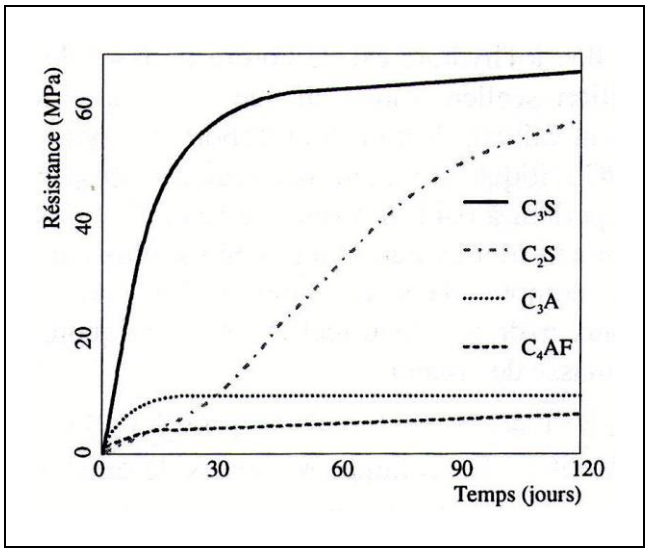
• le C_3A est un indésirable dans le ciment, car si la pate durcie est attaquée par des eaux sulfateuses, il peut y avoir formation de sulfoaluminates et la pâte risque d'éclater. Mais d'autre part, l'alumine est nécessaire dans le ciment car elle facilite les réactions dans le four rotatif.

• Une pâte de ciment hydratée contient: 50 à 70% de **C-S-H** et 25 à 27% de **Ca $(OH)_2$**.

• Le **Ca $(OH)_2$** est l'hydrate qui joue le rôle principal sur la durabilité car la chaux passive les armatures du béton armé, et elle permet de mobiliser une réaction pouzzolanique avec certains fines réactives, en formant des **C-S-H** secondaires

• La portlandite et les C-S-H remplissent peu à peu les pores, et le matériau devient dense et solide

• L'élément chimique le plus important pour le développement de la résistance mécanique du ciment est le C3S



Evolution de la résistance en compression des composants du ciment

3.1.4. Les grandeurs caractéristiques

Le ciment se caractérise par un certain nombre de critères mesurés de façon conventionnelle, soit sur la poudre, soit sur pâte, soit sur « mortier normal » (mélange normalisé de ciment, sable et eau défini par la norme NF EN 196-1)

a.1. La surface spécifique (finesse Blaine)

Elle permet de mesurer la finesse d'un ciment. Elle est caractérisée par la surface spécifique ou surface développée totale de tous les grains contenus dans un gramme de ciment (norme NF EN 196-6). Elle s'exprime en cm2/g. Suivant le type de ciment, cette valeur est généralement comprise entre 2 800 et 5 000 cm2/g.

a.2. La masse volumique apparente

Elle est de l'ordre de 1 000 kg/m^3 (1 kg par litre) en moyenne pour un ciment.

a.3. La masse volumique absolue

Elle varie de 2900 à 3150 kg/m^3 suivant le type de ciment.

b. Caractéristiques mesurées sur pâte ou sur « mortier normal »

b.1. Début et fin de prise

Déterminer par le temps d'enfoncement de l'aiguille de Vicat (voir TD)

b.2. L'expansion

b.3. Le retrait

La mesure du gonflement dans l'eau et du retrait dans l'air

b.4. Les résistances mécaniques

Mesurées sur éprouvettes 4x4x16 de mortier normal, elles caractérisent de façon conventionnelle la résistance à la compression à 28 jours du ciment.

3.1.5. Normalisation des ciments

Les ciments courants sont subdivisés en cinq types selon leur composition (voir tableau **1**) :

– **CEM I** – ciment Portland ;

– **CEM II** – ciment Portland composé ;

– **CEM lll** – ciment de haut-fourneau ;

– **CEM IV**– ciment pouzzolanique ;

– **CEM V** – ciment composé.

	Cim. Port-land	Ciment Portland composé		Ciment de haut fourneau			Ciment pozzolanique		Ciment au laitier et aux cendres	
	CPA-CEM I	CPJ-CEM II/A	CPJ-CEM II/B	CHF-CEM III/A	CHF-CEM III/B	CLK-CEM III/C	CPZ-CEM IV/A	CPZ-CEM IV/B	CLC-CEM V/A	CLC-CEM V/B
Clinker (K)	/95%	/80% ≤94%	/65% ≤79%	/35% ≤64%	/20% ≤34%	/5% ≤19%	/65% ≤90%	/45% ≤64%	/40% ≤64%	/20% ≤39%
Laitier (S)	*	6%≤ total ≤20% (fumée de silice ≤10%)	21%≤ total ≤35% (fumée de silice ≤10%)	/36% ≤65%	/66% ≤80%	/81% ≤95%	*	*	/18% ≤30%	/31% ≤50%
Pouzzolanes (Z)	*			*	*	*	10% ≤ total ≤35% (fumée ≤10%)	36% ≤ total ≤55% (fumée ≤10%)	18%≤ total ≤30%	31%≤ total ≤50%
Cendre siliceuses (V)	*			*	*	*				
Fumée de silice (D)	*			*	*	*			*	*
Cendres calciques (W)	*			*	*	*	*	*	*	*
Schistes (T)	*			*	*	*	*	*	*	*
Calcaires (L)	*			*	*	*	*	*	*	*
Fillers (F)	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*

Tableau 1 : Classification en fonction de leur composition : norme NF P 15-301

3.1.6. Classes de résistance des ciments

■ **Définition des classes de résistance**

Les ciments sont répartis en trois classes de résistance, 32,5 – 42,5 – 52,5, définies par la valeur minimale de la résistance normale du ciment à 28 jours en MPa

Tableau 2 – Classes de résistance des ciments à la compression (en Mpa) suivant NF EN 196-1

Désignation de la classe de résistance	Résistance à court terme		Résistance courante à 28 jours	
	à 2 jours	à 7 jours		
32,5 N	–	⩾ 16	⩾ 32,5	⩽ 52,5
32,5 R	⩾ 10	–		
42,5 N	⩾ 10	–	⩾ 42,5	⩽ 62,5
42,5 R	⩾ 20	–		
52,5 N	⩾ 20	–	⩾ 52,5	–
52,5 R	⩾ 30	–		

Tableau 2 : Classification des ciments en fonction de leur résistance

3.1.7 Désignation normalisée des ciments :

Les ciments sont désignés par leur type et par leur classe de résistance.

Exemple : **CPJ-CEM II/A 32,5 R**

C'est **un ciment Portland composé**, contenant de 80% à 94% de clinker et de 6% à 20% de fillers calcaires, de classe 32,5 ayant une résistance au jeune âge élevée.

3.1.8 Les autre type de ciment :

- **Ciment de laitier à la chaux** : CLX (NF P 15-306)

Ce ciment est un mélange de chaux hydrauliques et de laitier granulé de haut fourneau.

- **Ciment à maçonner** : CM (NF P 15-307)

Ce ciment contient les mêmes éléments actifs que le CPA mais ses résistances sont moins élevées.

- **Ciment naturel :** CN (NF P 15-308)

Ce ciment résulte de la mouture de roches clinkérisées, obtenues par la cuisson de calcaires marneux de composition très régulière et voisine de celle des mélanges d'argile et de calcaire servant à la fabrication du ciment Portland artificiel.

- **Ciment prompt naturel :** CNP (NF P 15-314)

Le ciment prompt naturel, à prise et durcissement rapides, résulte de la cuisson à température modéré d'un calcaire argileux de composition régulière, extrait de bancs homogènes, suivi d'un broyage fin.

- **Ciment alumineux fondu :** CA (NF P 15-315)

Le ciment alumineux fondu est un liant hydraulique qui résulte de la mouture, après cuisson jusqu'à fusion, d'un mélange composé principalement d'alumine, de chaux, d'oxydes de fer et de silice, dans des proportions telles que le ciment obtenu renferme au moins 30 % de sa masse d'alumine. II est réfractaire.

- **Ciment pour travaux à la mer :** PM (NF P 15-317)

Ces ciments présentent des teneurs limitées en aluminate tricalcique qui leur permettent de conférer au béton une résistance accrue à l'agression des ions sulfate en présence des d'ions chlorure.

- **Ciment pour travaux en eaux à haute teneur en sulfates** (XP P 15-319)

Ces ciments sont repérés dans leur appellation par les lettres **ES** recommandés pour les fondations en terrain gypseux, comme le cas CPJ-CEM II/A 42,5 ES.

❖ ***Tout en respectant les spécifications des normes qui fixent les conditions d'emplois de chaque liant, il faut retenir que :***

- **Les CPJ-CEM II 32.5** conviennent bien pour les **travaux de maçonnerie** et les bétons peu sollicités.
- En fondation, si le milieu est agressif il faudra utiliser des ciments à forte teneur en laitier (CHF, CLK et CLC). (les eaux agressives attaquent les ciments à base principale de clinker).
- En élévation, il faut au contraire éviter l'emploi des ciments riches en laitier parce qu'ils sont sensibles à la dessiccation, qui durcit moins vite.
- Pour réaliser des bétons de masse il est préférable d'utiliser des ciments à faible chaleur d'hydratation *(ex.: CPJ)*.
- Pour les travaux de béton armé on peut utiliser tous les ciments portland (CPA et CPJ)
- Pour les travaux de béton précontraint on utilise le ciment portland artificiel (CPA)

- Les classes R seront préférées pour les travaux exigeant des hautes résistances initiales pour permettre un décoffrage rapide par exemple.

Exemple de dénomination

CEM II / B - M (S-V) 42,5N PM-ES-CP2*

Famille de ciments
Il existe :
CEM I : ciment Portland
CEM II : ciment Portland composé
CEM III : ciment de haut fourneau
CEM IV : ciment pouzzolanique
CEM V : ciment au laitier et aux cendres

Quantité de constituants principaux autres que le clinker (en % d'ajout)
A : de 6 à 20%
B : de 21 à 35 %
C : de 36 à 65 %
(laitier pour les CEM III)

Ciment avec au moins 2 constituants principaux autres que le clinker

** Voir la norme française du ciment NF EN 197-1*

Noms des constituants principaux
S : laitier granulé de hauts fourneaux
V : cendres volantes siliceuses
W : cendres volantes calciques
L ou LL : calcaire (en fonction du taux de carbone organique)
D : fumée de silice
P ou Q : matériaux pouzzolaniques
T : Schiste calciné

Classes de résistance (résistance caractéristique minimum à 28 jours exprimée en MPa) :
32,5 ou 42,5 ou 52,5

Sous-classes de résistance (résistance caractéristique minimum à 2 jours exprimée en MPa).
N : Normal
R : Rapide

Caractéristiques complémentaires
PM : ciment pour travaux à la mer
ES : ciment pour travaux en eau à haute teneur en sulfates
CP : ciment à faible chaleur d'hydratation initiale et à teneur en sulfures limitée

II. Les granulats

Définitions

- On appelle granulats les matériaux inertes, destinés à être agglomérés par un liant et qui entrent dans la composition des bétons (sables, graviers ou cailloux).
- Les granulats sont obtenus en exploitant des gisements de sables et de graviers d'origine alluvionnaire terrestre ou marine, en concassant des roches massives (calcaires ou éruptives) ou

encore par le recyclage de produits tels que les matériaux de démolition. Leur nature, leur forme et leurs caractéristiques varient en fonction des gisements et des techniques de production.

- Les granulats sont nécessaires pour la fabrication des bétons; ils constituent le squelette granulaire du béton et ils représentent dans les cas usuels, environ 80 % du poids total du béton.

1. Différent types de granulats

Un granulat, en fonction de sa nature et de son origine, peut être…

1. Naturel : d'origine minérale, issus de roches meubles (alluvions) ou de roches massives, n'ayant subi aucune transformation autre que mécanique (tels que concassage, broyage, criblage, lavage). On les distingue selon leur origine :

• Origine minéralogique : roches sédimentaires (siliceuses ou calcaires), roches métamorphiques (quartz ou quartzites), roches éruptives (basaltes, granites, porphyres).

• Origine « d'extraction »:

- Granulats alluvionnaires dits roulés (forme acquise par l'érosion).
- Granulats de carrières aux formes angulaires (obtenus par abattage et concassage).

2. Artificiel : d'origine minérale résultant d'un procédé industriel comprenant des transformations thermiques ou autres (l'argile ou le schiste expansé).

3. Recyclé : Obtenu par traitement d'une matière inorganique utilisée précédemment dans la construction, tels que des bétons de démolition de bâtiments.

2. Classe granulaire

Les granulats sont classés en fonction de leurs grosseurs déterminées par criblage sur des tamis à mailles carrées dont la dimension intérieur est exprimée en millimètres.

Un granulat est caractérisé en point de vue granulaire par sa classe d/D, d et D étant respectivement la plus petite et la plus grande dimension des grains. Lorsque d est inférieure a 2 mm, le granulat est désigné 0/D

- La norme NF P 18-540 précise les appellations des différentes classes granulaires avec leurs caractéristiques dimensionnelles :

Filler 0/D : pour « D » < 2 mm et ayant au moins 70% de grains passant au tamis de 0,063 mm ;
Sablon 0/D : pour « D » ≤ 1 mm et ayant au moins 70% de grains passant au tamis de 0,063 mm ;
Sable 0/D : lorsque « D » est tel que : 1 mm < D ≤ 6,3 mm ;
Graves 0/D : lorsque D > 6,3 mm ;
Gravillons d/D : lorsque d ≥ 1 mm et D ≤ 125 mm ;
Ballaste d/D : lorsque d ≥ 25 mm et D ≤ 50 mm ;

- 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- 0,10- **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**- 5- 6,3- **8**- 10- 12,5- 14- **16**- 20- 25- **31,5**- 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 ; 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 granulométrique.

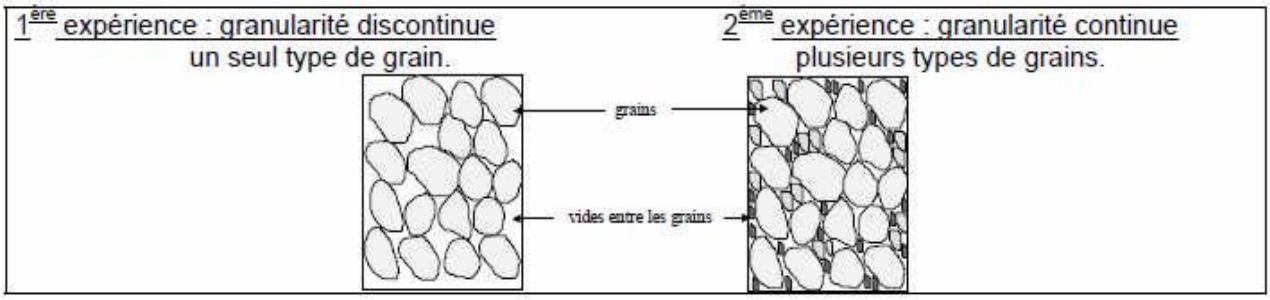
3. Caractéristiques des granulats

Le choix des granulats est un facteur important de la composition du béton puisqu'ils représentent les deux tiers du volume de béton. Afin d'obtenir le granulat recherché, il est impératif de connaître quelques unes de ses caractéristiques.

4.1. Caractéristiques physiques

4.1.1. La granulométrie

- **Définition:** La granulométrie permet de déterminer l'échelonnement des dimensions des grains continues dans un granulat.



- On constate que le ciment devra combler les vides entre les grains pour obtenir un béton de compacité maximale. Or le ciment est le constituant le plus cher dans la composition de béton. Il donc est souhaitable de laisser le moins de vides entre les grains. Pour cela on recherchera un dosage optimum de gravier, sable, ciment. Il faudra donc déterminer la dimension des grains constituant un sable ou un gravier à l'aide d'un essai en laboratoire appelé A**nalyse granulométrique** (NF P 18-560), afin de tracer la courbe granulométrique de ces grains**.**

On trace la courbe granulométrique a l'aide de l'essai analyse granulométrique sur un graphique comportant en ordonnée le pourcentage du tamisât sous les tamis dont les mailles D sont indiquées en abscisse selon une graduation logarithmique. Le poids des tamisât successifs permet de déterminer les pourcentages du tamisât correspondant à chacun des tamis utilisés.

La forme des courbes granulométriques apporte les renseignements suivants (figure 01):

- Les limites d et D du granulat en question ;
- La plus ou moins grande proportion d'éléments fins, par exemple : la courbe 02 correspond à un sable à majorité de grains fins et c'est l'inverse pour la courbe 03. Les trois sables présentés par

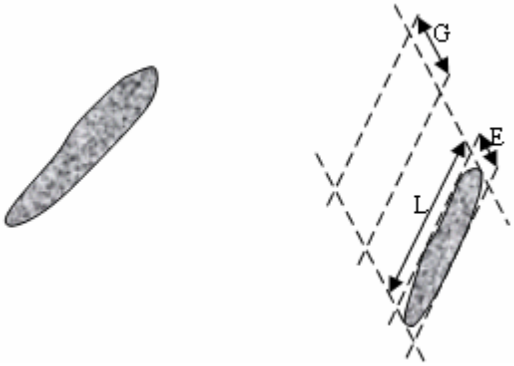
les courbes 1, 2, 3 sont des sables 0/5mm mais les proportions de grains fins (< 0,5mm) sont pour chacun d'eux : 45%, 60%, 25%.

- La continuité ou la discontinuité de la granularité, par exemple : les courbes de sable sont continues mais la courbe de gravier 5/31,5 présente une discontinuité (en effet le palier s'étendant de 10 à 20mm signifie que le granulat en question ne contient pas de grains compris entre 10 et 20 mm.

4.1.2. Forme des gravillons (Coefficient d'aplatissement)

La forme des gravillons est déterminée par **l'essai d'aplatissement (A)**. Le coefficient d'aplatissement caractérise la forme du granulat à partir de sa plus grande dimension et de son épaisseur. Plus **A** est élevé, plus le gravillon contient d'éléments plats. Une mauvaise forme à une incidence sur la maniabilité et favorise la ségrégation.

 La forme d'un granulat est défini par trois grandeurs géométriques (figure 2)



G/E > 1,58

Figure 2 : Forme d'un granulat

- La longueur **L**, distance maximale 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:

 La forme des granulats influence

- La facilité de mise en œuvre et le compactage du béton.
- La compacité du mélange, donc le volume des vides à remplir par la pâte de ciment.

 L'état de surface des grains influence:

- La compacité du mélange.
- L'adhérence du granulat à la pâte de ciment.
- La forme est d'autant meilleure qu'elle est proche d'une sphère ou d'un cube.

cubes, sphères	trois dimensions à peu près égales *(bonne compacité)*
plaquettes	une dimension beaucoup plus petite que les deux autres *(mauvaise compacité)*
aiguilles	une dimension beaucoup plus grande que les deux autres *(très mauvais compacité)*

Tableau 3.5: Forme des granulats

4.2. Les masses volumiques

On distingue 2 types de masses volumiques

4.2. 1. La masse volumique absolue :

La masse volumique absolue du granulat (vides entre grains exclus) est nettement plus élevée: de 2500 à 2600 kg/m3. $\boldsymbol{\gamma_s = \frac{M_s}{V_s}}$

4.2.2. La masse volumique apparente :

Elle dépend du tassement des grains. Elle est comprise entre 1400 kg/m^3 et 1600 kg/m^3 pour les granulats roulés silico-calcaires. $\boldsymbol{\gamma_{app} = \frac{M_T}{V_T}}$

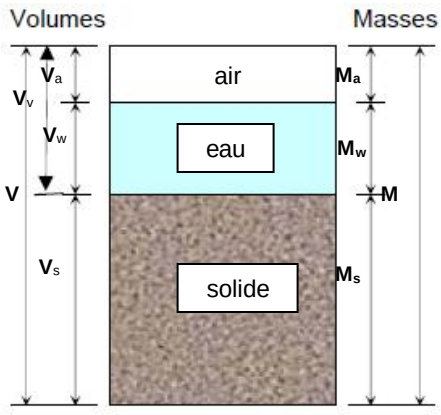
4.3. Teneur en eau, indice des vides, porosité et compacité

Dans les sols ainsi que dans les granulats, nous retrouvons les 3 phases de la matière.

Ces 3 phases se modélisent comme suit (figure 2) :

Avec :

- **V** : volume total du matériau
- **V**a : volume d'air contenu dans le matériau
- **V**w : volume d'eau contenu dans le matériau;
- **V**v : volume des vides contenu dans le matériau : (**V**v= **V**a+ **V**w);
- **V**s: volume des grains solides contenus dans le matériau;
- **Ma** : masse de l'air contenu dans le matériau; elle est en général négligeable ;
- **Mw** : masse d'eau contenu dans le matériau;
- **M**s: masse des grains solides contenus dans le matériau;
- **M :** masse totale du matériau (sèche ou humide).



Teneur en eau	$W = \frac{M_w}{M_s} \times 100$
Indice des vides	$e = \frac{V_v}{V_s}$
Porosité	$n = \frac{V_v}{V}$
compacité	$c = \frac{V_s}{V}$

Figure 2 : Les trois phases de la matière

4.4. Foisonnement

Le foisonnement correspond à une variation de volume (figures 3 et 4). Les essais réalisés au laboratoire ont permis de constater que la masse volumique humide des granulats de faible dimension notamment des sables fins, varie avec la teneur en eau (w%).

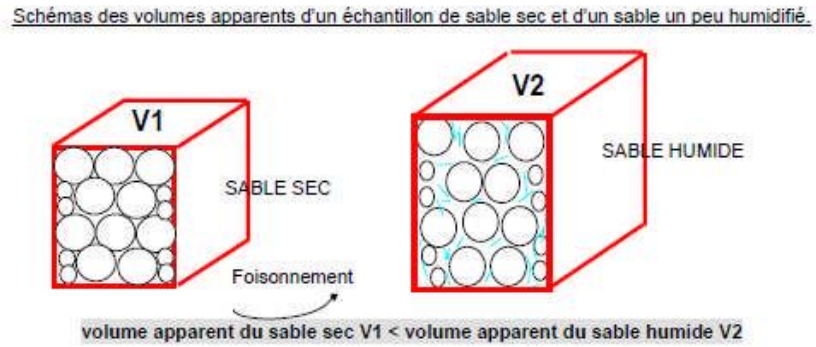


Figure 3 : Schémas des volumes apparents d'un échantillon de sable sec et d'un sable un peu humidifié.

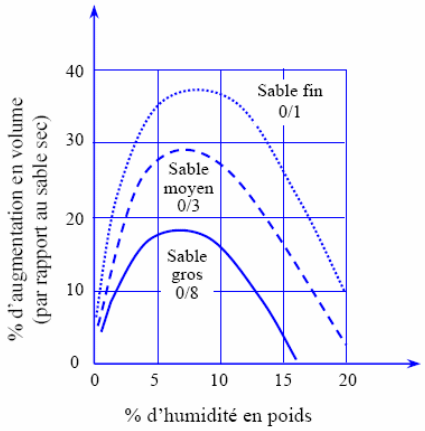


Figure 4 : Foisonnement du sable en fonction de la teneur en eau

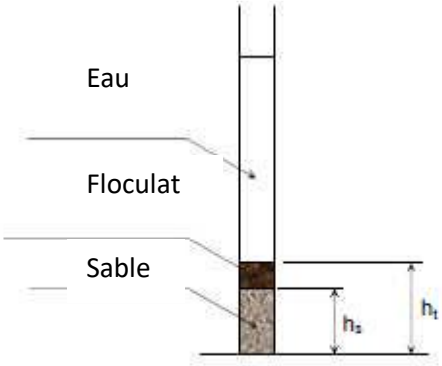
3.5. Absorption

La plupart des granulats stockés dans une atmosphère sèche pendant un certain temps, peuvent par la suite absorber de l'eau. Le processus par lequel le liquide pénètre dans la roche et l'augmentation de poids qui en résulte sont appelés absorption.

L'absorption peut varier dans de très larges mesures suivant la nature du granulat. Elle peut varier de 0 à plus de 30 % du poids sec pour granulat léger.

4.2. Caractéristiques physico-chimiques

- Les impuretés peuvent perturber l'hydratation du ciment ou entraîner des défauts d'adhérence granulats- pâte, ce qui peut avoir une incidence sur la résistance du béton. La propreté traduit l'absence d'éléments fins indésirables dans les granulats. Elle désigne essentiellement la teneur en fines argileuses, dont la valeur doit être limitée.
- Dans le cas des gravillons, elle est donnée par le pourcentage de passant au tamis de 0,5 mm (tamisage effectué sous eau).
- Dans le cas des sables, la propreté (SE) est fournie par l'essai appelé « équivalent de sable » (figure 5) qui permet de mesurer la fraction argileuse du matériau.
- L'essai consiste à séparer le sable des matières argileuses ou fines, qui remontent par floculation à la partie supérieure de l'éprouvette où l'on a effectué le lavage (plus la valeur de SE est grande, plus le sable est propre).
- Elle peut également être évaluée par « l'essai au bleu de méthylène (VB) » , plus la valeur de VB est petite, plus les sables sont propres.



$$\text{Equivalent de sable : ES} = \frac{h_2}{h_1} \times 100$$

Figure 5: Essai d'équivalent de sable

- Il faut souligner l'importance de la propreté des granulats sur la qualité du béton. La présence de particules argileuses est en effet défavorable, autant à la mise en œuvre du béton qu'à ses performances finales, en abaissant l'adhérence de la pâte de ciment sur les granulats. D'autres impuretés telles que les particules organiques sont susceptibles de nuire aux qualités du béton et perturber son durcissement.
- Les sels tels que les sulfates ou les sulfures, peuvent être à l'origine de phénomènes de gonflement ou de tâches. Les corps étrangers (lignites ou scories) sont à proscrire.

4.3. Caractéristiques chimiques

4.3.1. Teneur en ions chlorures

Les chlorures modifient la cinétique d'hydratation du ciment et provoquent la corrosion des armatures.
La teneur en chlorure issu de l'ensemble des constituants du béton est donc limitée.

4.3.2. Réactivités aux alcalis

Dans des conditions défavorables (granulats contenant une fraction significative de silice soluble réactive dans un environnement riche en alcalin) et en présence d'humidité, les phénomènes d'alcaliréaction peuvent provoquer un gonflement du béton.

4.3.3. Teneur en soufre et en sulfates

Les granulats peuvent contenir de faibles quantités de sulfates et de sulfures sous réserve que leur teneur en soufre total S n'excède pas 0,4 % en masse. La teneur en sulfates (SO3) doit être inférieure à 0,2 %. On la détermine si S est supérieure à 0,08 %.
Les sulfures présents dans les granulats peuvent en s'oxydant se transformer en sulfates qui risquent de générer des phénomènes de gonflement. Il faut donc limiter la teneur en souffre pour se prémunir de ce phénomène. Les sulfates peuvent perturber la prise et les actions des adjuvants d'où la nécessité de limiter leur teneur dans le béton.

4.4. Caractéristiques mécaniques

4.4.1. Résistance à l'usure des gravillons

La résistance à l'usure des granulats est déterminée par **" l'essai Micro-Deval** " en présence d'eau. Cet essai consiste à reproduire dans un cylindre en rotation des phénomènes d'usure par frottements. Cette résistance est caractérisée par le coefficient Micro-Deval MDE qui représente la proportion d'éléments fins produits pendant l'essai. Plus le coefficient MDE est faible, plus la résistance à l'usure des gravillons est élevée.

4.4.2. Résistance à la fragmentation des gravillons

La résistance à la fragmentation est déterminée par le coefficient Los Angeles. Le principe de cet essai est la détermination de la résistance à la fragmentation par chocs et à l'usure par frottements réciproques. L'essai consiste à faire tourner les granulats dans un tambour fermé contenant des boulets métalliques.

4.4.3. Résistance au polissage des gravillons

Cette caractéristique concerne les granulats utilisés pour la réalisation de couches de roulement. Plus le coefficient de polissage accéléré (CPA) est élevé, plus la résistance au polissage est importante.

4.4.4. Résistance des gravillons au gel-dégel

La vulnérabilité du granulat dans le béton à l'action du gel-dégel est fonction de sa nature, de son utilisation, des conditions climatiques et de la formulation du béton (utilisation par exemple d'air entraîné).

4.5. Caractéristiques esthétiques

Les granulats contribuent à la teinte des parements des bétons. Ils sont mis en valeur en fonction du traitement de surface appliqué. On utilise indifféremment en fonction des disponibilités et de l'aspect recherché des granulats roulés, concassés ou semi-concassés. Les sables et les gravillons sont disponibles dans une large variété de teintes naturelles.
La teinte des bétons ayant subi un traitement de surface (béton lavé, béton désactivé, béton bouchardé, béton poli) est liée à la couleur des gravillons et des gros grains de sable.

4. Le choix des granulats selon la fonction du béton

Choix des granulats des bétons			
Nature des bétons ou de l'ouvrage		***Nature des granulats***	***Masse volumique des bétons***
Bétons classiques pour chantier ou usine de préfabrication		Tous granulats roulés ou concassés avec préférence pour les siliceux, les calcaires ou les silico-calcaires	2 200 à 2 400 kg/m³
Bétons apparents, architectoniques		Les mêmes mais aussi les porphyres, basaltes, granites, diorites, qui offrent une palette très riche d'aspects et de teintes	2 200 à 2 400 kg/m³
Usages routiers		Toutes origines roulés ou concassés	2 200 à 2 300 kg/m³
Bétons légers	pour structure	Argile ou schiste expansé, laitier expansé	1 500 à 1 800 kg/m³
	semi-isolant semi-porteur	Argile expansée, pouzzolane, ponce	1 000 à 1 500 kg/m³
	isolant	Vermiculite, liège, bois, polystyrène expansé, verre expansé	300 à 800 kg/m³
Bétons lourds		Corindon, barytine, magnétite	3 000 à 5 000 kg/m³
Bétons réfractaires		Corindon, déchets de produits réfractaires, granulats spéciaux	2 200 à 2 500 kg/m³
Bétons ou chapes pour dallages industriels (soumis à une abrasion importante)		Corindon, carborundum, granulats métalliques	2 400 à 3 000 kg/m³