

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de : Génie Civil & Hydraulique

Polycopié de cours

MATERIAUX DE CONSTRUCTION 1

*Destiné aux étudiants de la 2eme année Licence Filière Génie Civil
et Travaux Publics*



Elaboré par : Dr. KECHKAR Chiraz

Année universitaire : 2022 - 2023

Avant-propos

Ce document est un développement du cours « matériaux de construction 1 » qui a comme objectif de :

- initier les étudiants à la connaissance des processus d'élaboration des matériaux de construction, de la matière première jusqu'au produit fini,*
- permettre à l'étudiant de caractériser les paramètres physico-mécaniques des matériaux de construction, donc un choix optimal pour leurs utilisation dans la réalisation des ouvrages.*

Comme un support pédagogique, Il est destiné particulièrement, aux étudiants de la 2eme année ST filière de génie civil et travaux public « semestre 2 ». Le polycopié est rédigé en respectant le programme élaboré par le ministère Algérien de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique, il est composé de six chapitres.

Le document est rédigé de manière simplifiée et quelques exemples sont introduits après avoir donné des notions afin que l'étudiant puisse assimiler le contenu du cours et son application dans la vie courante.

Dr. KECHKAR C.

Table de matière

Avant propos	
Table de matière	
Introduction générale	1

CHAPITRE 1. GÉNÉRALITÉS, PROPRIETES GENERALES DES MATERIAUX DE CONSTRUCTION

1. Historique des matériaux de construction	02
2. Choix des matériaux de construction	03
3. Classification des matériaux de construction	03
a) Classification scientifique	03
b) Matériaux de base et produits	03
c) Classification pratique	04
4. Propriétés des matériaux de construction	04
4.1. Les propriétés physiques	05
4.1.1. La masse volumique	05
4.1.2. La densité	06
4.1.3. La porosité et compacité	06
4.1.4. L'humidité (teneur en eau)	07
4.1.5. L'absorption de l'eau	07
4.2. Les propriétés mécaniques	08
4.2.1. La déformation	08
a) Déformation élastique	08
b) Déformation plastique	09
c) Le fluage	10
4.2.2. La résistance mécanique	10
a) Détermination de la résistance mécanique	10
b) Limite d'élasticité	12
c) Résistance à la rupture	12
4.2.3. Module d'élasticité ou de Young	13

CHAPITRE 2. LES GRANULATS

1. Introduction	14
2. Définition	16
3. Différents types de granulats	16
3.1. Les granulats naturels	17
3.2. Les granulats artificiels	18
4. Classification des granulats	19
4.1. Selon la granularité	19
4.2. Selon la densité	19
5. Les caractéristiques principales des granulats	19
5.1. Caractéristiques géométriques	19
a) Granulométrie	19
5.2. Caractéristiques physiques	25
5.2.1. Masse volumique	25
5.2.2. Propreté des granulats	25
5.2.3. Teneur en eau	26
5.2.4. Foisonnement	27
5.3. Caractéristiques mécaniques	27
5.3.1. Essai Micro Deval	27
5.3.2. Essai Los Angeles	28
5.3. Propriétés Chimiques	29
5.3.1. Teneur en ions chlorures	29
5.3.2. Réactivités aux alcalis	29
5.3.3. Teneur en soufre et en sulfates	29
6. Les principales opérations effectuées pour l'élaboration des granulats concassés	30

CHAPITRE 3. LES LIANTS

1. Introduction	31
2. Liants aériens (Chaux grasse)	31
2.1. Propriétés principales de la chaux grasse	32
2.2. Utilisation de la chaux grasse dans le bâtiment	32
a) Enduits	32
b) Mortiers de pose et de jointement	32
3. Liants hydraulique (ciment portland)	33
3.1. Définition	33
3.2. Bref historique du ciment	33
4. Fabrication du ciment	33

4.1. Extraction	34
4.2. Concassage	35
4.3. Préparation du cru	35
4.4. Cuisson	36
4.5. Refroidissement	36
4.6. Broyage	37
4.7. Stockage	37
5. Ajouts cimentaires	38
6. Classification et Caractéristiques des ajouts cimentaires	38
6.1. Les additions de type I	38
6.2. Les additions de type II	38
7. Types de ciments en fonction de leur composition	39
7.1. Ciment portland CPA-CEM I	39
7.2. Ciment portland composé C.P.J-CEM II	40
7.3. Ciment de haut fourneau CHF-CEM III	40
7.4. Ciment pouzzolanique CPZ-CEM IV	40
7.5. Ciment au laitier et aux cendres CLC-CEM V	41
7.6. Autre types de ciment	41
8. Critères de choix du ciment	42
9. Les caractéristiques du ciment	42
9.1. Caractéristiques de la poudre	42
a) La surface spécifique (finesse Blaine)	42
b) La masse volumique apparente	43
c) La masse volumique absolue	43
9.2. Caractéristiques mesurées sur pâte ou sur « mortier normal »	43
a) Le début de prise	43
b) La chaleur d'hydratation	44
c) Durcissement	44
d) L'expansion	45
e) Le retrait	45
f) Les résistances mécaniques	45
10. Classification des ciments en fonction de leur résistance nominale	46

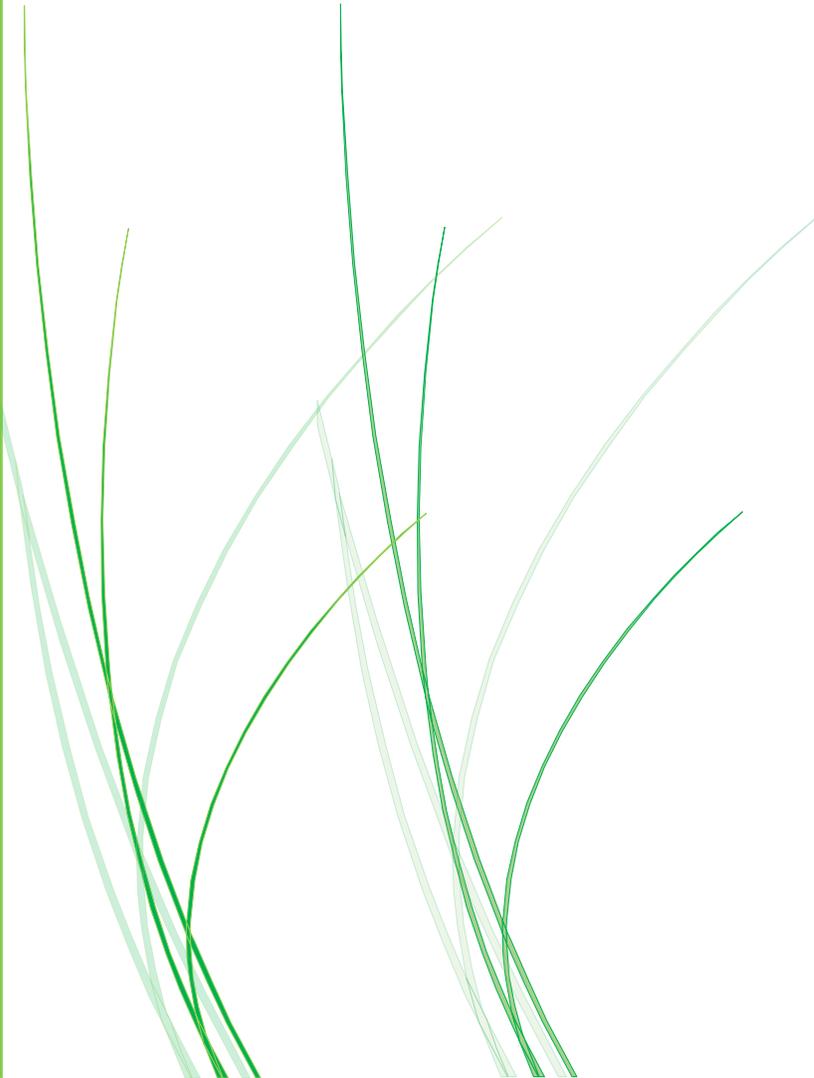
CHAPITRE 4. LES MORTIERS

1. Introduction	47
2. Composition des mortiers	47
3. Les différents types de mortiers	48
3.1. Les mortiers de ciment.....	48
3.2. Les mortiers de chaux	48
3.3. Les mortiers bâtards.....	48

3.4. Mortiers fabriqués sur chantier	48
3.5. Mortier industriel	49
4. Les emplois des mortiers	49
4.1. Les joints de maçonnerie	49
4.2. Les enduits	50
4.3. Les chapes	50
4.4. Les scellements et les calages	50
5. Les essais sur mortier frais	51
5.1. Consistance (Ouvrabilité)	51
5.2. Délais de prise	52
6. Les essais sur mortier durci	53
6.1. Confection et conservation des éprouvettes de mortier	53
6.2. Retrait et gonflement	54
6.3. Résistances mécaniques	54
6.3.1. Mesure de la résistance à la traction par flexion	54
6.3.2. La résistance à la compression	55
Références	56



INTRODUCTION GENERALE



INTRODUCTION GENERALE

La connaissance des propriétés des matériaux est essentielle à la conception et à la fabrication d'objets techniques. Afin que l'objet technique remplisse sa fonction globale et résiste aux différentes contraintes qu'il subit, il est important de sélectionner les matériaux adéquats.

Le cours **matériaux de construction 1** permet aux étudiants d'apprendre à effectuer des choix de matériaux de construction en fonction de leurs propriétés, dans les conditions de cohérence, de sécurité, de durabilité et de coût. Aussi prendre conscience de la diversité des matériaux et de leur usage en bâtiment. Il est divisé en quatre chapitres selon le programme de la deuxième année LMD :

- Le premier chapitre concerne une introduction générale sur les matériaux de construction, la classification et propriétés des matériaux de construction.
- Le deuxième chapitre est basé sur l'étude de la granularité, la classification des granulats, les caractéristiques et les différents types de granulats.
- Au chapitre 3ème on s'intéresse à l'étude des liants aériens (chaux aérienne) et les liants hydrauliques (les ciments portland) avec leurs constituants principaux et les différents types d'additions minérales employées en cimenterie et leurs apports techniques.
- Enfin, au 4ème chapitre, on aborde la composition, les différents types de mortiers (mortier de chaux, mortier de ciment), les caractéristiques principales et leurs emplois dans les chantiers.



CHAPITRE 1

**GÉNÉRALITÉS, PROPRIÉTÉS
GÉNÉRALES DES MATÉRIAUX
DE CONSTRUCTION**



CHAPITRE I : GÉNÉRALITÉS, PROPRIÉTÉS GÉNÉRALES DES MATÉRIAUX DE CONSTRUCTION

1. Historique des matériaux de construction

Les matériaux de construction sont des matériaux utilisés dans les secteurs de la construction : bâtiments et travaux publics (souvent désignés par le sigle BTP). Ils couvrent une vaste gamme des matériaux qui inclut principalement le bois, le verre, l'acier, l'aluminium, les textiles, les matières plastiques (isolants notamment) et les matériaux issus de la transformation de produits de carrières, qui peuvent être plus ou moins élaborés (incluant le béton et divers dérivés de l'argile tels que briques, tuiles, carrelages et divers éléments sanitaires).

Le bois, la pierre, la terre crue et la terre cuite sont les matériaux traditionnels qui ont conditionné la manière de concevoir les bâtiments. Si les premiers sont disponibles à même le sol, la terre cuite est la première pierre artificielle employée. Par la suite, dès l'Antiquité, d'autres matériaux exigeant une préparation et des processus complexes de transformation, comme la chaux ou le plâtre, obtenus par chauffage de pierre calcaires ou de gypse sont employés. Additionnés de la pouzzolane ou de brique pilée, ils permettent à la Rome antique, de réaliser les premiers bétons basés sur de la chaux. Jusqu'à la révolution industrielle, le fer, la fonte, le verre ne sont employés que de manière marginale.

MATERIAUX	1ere usage	T production
Brique en boue et argile	8000 av.JC	
Objet en céramique, briques et en terre cuite	6000 av.JC	
Murs en briques couverts d'un enduit de gypse	5000 av.JC	180°C
Encadrements des portes en bois, poutre en bois	5000 av.JC	
Agrégats et fibres pour l'armature	5000 av.JC	
Objets en verre	3000 av.JC	
Mortier de chaux et chaux hydraulique	1000 av.JC	
Béton à base de chaux hydraulique, ciments pouzzolaniques	100 av.JC	
Ciment hydraulique	1793	1300°C
Béton à base de ciment Portland	1824	1450°C
Béton armé (Monier)	1848	

Tableau I.1. Exemple de la 1ere utilisation des matériaux de construction dans le monde.



-500 000 ans



-2 000 ans



-500 ans

Figure I.1. Exemple de l'évolution des matériaux de construction dans le temps.

2. *Choix des matériaux de construction :*

Les critères de choix des matériaux doivent tenir compte des facteurs suivants :

– *fonctions principales de la construction :*

Modes de mise en charge, des températures et des conditions générales d'utilisation.

– *comportements intrinsèques du matériau :*

Résistance à la rupture, à l'usure, à la corrosion, conductibilité, etc...

– *prix de revient :*

Un matériau plus cher, mais plus isolant et donc plus économe en énergie, peut sur la durée se révéler le moins coûteux... Ce qui devrait nous inciter à construire écologique !

3. *Classification :*

On distingue trois types de classification les plus couramment connus :

a) *Classification scientifique :* Dans la science des matériaux, selon la composition et la structure, les matériaux sont classés comme suit :

- Métaux et alliages
- Polymères
- Céramiques

b) *Matériaux de base et produits :*

- Matériaux de base ou matière première (Argiles, pierres, bois, calcaire, métaux).

- Matériaux produits et composites (ciment (calcaire + argile), alliages, béton,

c) *Classification pratique :*

Dans la construction, les matériaux sont classés selon le domaine d'emploi et selon leurs propriétés principales (Résistance, compacité,..) comme suit :

- matériaux de construction (de résistance) : matériaux qui ont la propriété de résister contre des sollicitations (forces) importantes (poids propre, surcharge, séisme, chaleur, ..) : pierre, bois, béton ...
- matériaux de protection : ce sont les matériaux qui ont la propriété d'embrober et de protéger les matériaux de construction principaux des agents extérieurs (rouille, corrosion) : enduits, peinture, bitumes ...

On peut aussi classer les matériaux de construction selon leur :

- nature de la matière première (naturelle ou artificielle),
- propriétés spécifiques (béton étanche, béton décoratif),
- domaines d'utilisation (Bâtiment, Travaux publics, Travaux fluviaux, Travaux maritimes,...)

4. Propriétés des matériaux de construction :

Toute valeur permettant de déterminer une caractéristique donnée et appelée propriété. La connaissance des propriétés des matériaux permet de prévoir leur capacité à résister sous des conditions diverses.

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

- Propriétés physiques : qui mesurent le comportement de matériaux à l'action de la température, l'humidité (la dimension ; la densité ; la masse volumique de différentes conditions ; la porosité; l'humidité etc..),
- Propriétés mécaniques : qui reflètent le comportement des matériaux déformés par les forces (la résistance en compression, en traction, en torsion etc..)
- Propriétés chimiques : qui caractérisent le comportement des matériaux dans un environnement réactif. (l'alcalinité, résistance à la corrosion, aux acides etc..)
- Propriétés physico-chimiques : (l'absorption, la perméabilité, le retrait et le gonflement etc..)
- Propriétés thermiques : (la dilatation, la résistance et comportement au feu, etc.

Dans ce cours on va présenter quelques propriétés comme les propriétés physiques et les propriétés mécaniques.

4.1. Les propriétés physiques

4.1.1. La masse volumique :

Soit M_s une masse d'un granulat en vrac

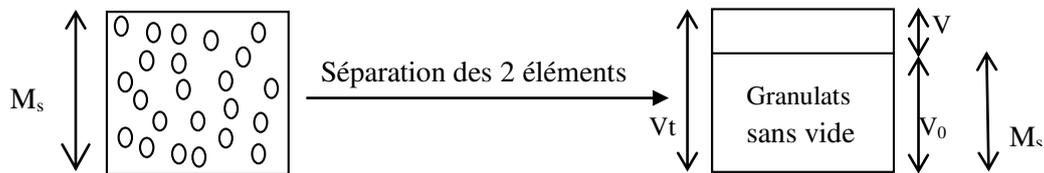


Figure I.2. Répartition entre particules solides et air dans un matériau poreux.

M_s : masse des granulats

V : volume des vides inter-granulaire

V_0 : volume des granulats ou volume absolu

V_t : volume total (volume des granulats + volume des vides) $V_t = V_0 + V$

La masse volumique d'un corps est la masse de l'unité de volume de ce corps. Comme on distingue le volume absolu et le volume apparent, il faut distinguer de même : la masse volumique absolue et la masse volumique apparente.

- La masse volumique apparente :

Est la masse d'un corps par unité de volume total y compris les vides entre les grains (volume apparent) V_t .

$$\gamma_{app} = \frac{M_s}{V_t} \quad (I.1)$$

M_s : : masse des granulats en g, kg, t

V_t : volume total en cm^3 , dm^3 et m^3

γ_{app} : masse volumique apparente en g/cm^3 ou t/m^3

- La masse volumique absolue :

C'est la masse d'un corps par unité de volume absolu de matière pleine (volume de matière seule, pores à l'intérieur des grains exclus) V_0

$$\gamma_{ab} = \frac{M_s}{V_0} \quad (I.2)$$

4.1.2. La densité :

La densité est le degré de remplissage de la masse d'un corps par la matière solide. Elle est calculée par le rapport de la masse volumique de ce matériau à celle de l'eau à une température de 20°C. Elle est exprimée sans unité.

- Densité absolue : est le rapport de la masse volumique absolue à la masse d'un égal volume d'eau, c'est un rapport sans dimension.

$$D_{ab} = \frac{\gamma_{ab}}{1000} \quad (I.3)$$

- Densité apparente relative à la masse volumique apparente

$$D_{app} = \frac{\gamma_{app}}{1000} \quad (I.4)$$

4.1.3. La porosité et compacité :

- Porosité :

La porosité est le rapport du volume vide au volume total

$$P = \frac{V}{V_t} \times 100\% \quad (I.5)$$

- Compacité :

La compacité (c) est le rapport du volume des grains solides au volume total.

$$C = \frac{V_0}{V_t} \times 100\% \quad (I.6)$$

La porosité et la compacité sont liées par relation :

$$P + c = 1$$

La porosité et la compacité sont souvent exprimées en pourcentage (%). La somme des deux est alors égale à 100%.

- Indice des vides (I) :

C'est le quotient de la porosité par la compacité.

$$I = \frac{P}{C} \quad (I.7)$$

4.1.4. L'humidité (teneur en eau)

L'humidité est une des propriétés importante des matériaux de construction. Elle est un indice pour déterminer la teneur en eau réelle des matériaux au moment de l'expérience. En général l'humidité est notée W et s'exprime en pourcentage (%). On peut déterminer l'humidité de matériaux quelconques en utilisant la formule suivante :

$$W = \frac{M_h - M_{sec}}{M_s} \times 100\% \quad (I.8)$$

où

M_{sec} est la masse sèche d'échantillon (après passage à l'étuve a 105C°)

M_h est la masse humide d'échantillon.

Le degré de l'humidité des matériaux dépend de beaucoup de facteurs, surtout de l'atmosphère où ils sont stockés, le vent, la température et de la porosité du matériau

4.1.5. L'absorption de l'eau :

L'absorption de l'eau est le pouvoir d'un matériau d'absorber et de retenir l'eau lorsqu'il est immergé à température de 20 °C et à la pression atmosphérique. A cette condition l'eau peut pénétrer dans la plupart des vides interstitiels du matériau. Si la porosité de ce dernier est importante, l'absorption de l'eau est plus grande, mais elle est toujours inférieure à la porosité du matériau.

L'absorption d'eau A_b (%) est la différence entre la masse d'un échantillon saturé dans l'eau et sa masse à l'état sec. Elle se calcul comme suit :

$$A_b = \frac{M_{sat} - M_{sec}}{M_s} \times 100\% \quad (I.8)$$

où

M_{sat} : la masse saturée de l'échantillon.

M_{sec} : la masse sèche de l'échantillon.

4.2. Les propriétés mécaniques

4.2.1. La déformation :

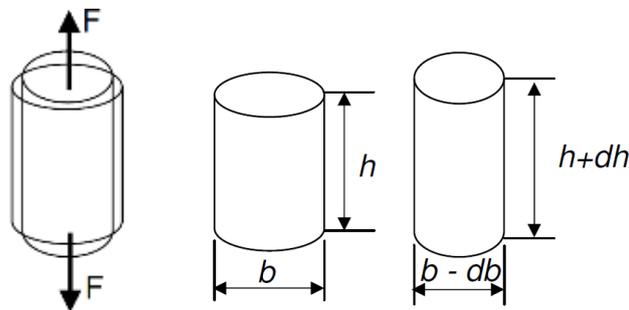
Lorsqu'un matériau est soumis à un chargement il se déforme : sa forme et ses dimensions changent. Les matériaux ne se déforment pas de la même façon.

Un corps cylindrique soumis à une traction s'allonge. On appelle déformation longitudinale ε_l le rapport de l'allongement dh à la longueur initiale h .

$$\varepsilon_l = \frac{dh}{h} \quad (\text{I.9})$$

Dans l'autre sens le corps se rétrécit. On appelle Déformation transversale ε_t le rapport du rétrécissement db à la largeur initiale b .

$$\varepsilon_t = \frac{db}{b} \quad (\text{I.10})$$



La déformation est une des propriétés essentielles pour les matériaux de construction. Selon la caractérisation des déformations, on les divise en deux sortes :

a) Déformation élastique :

Lorsque l'on effectue un essai de mise en charge et si, après décharge le corps reprend les mêmes formes qu'il avait avant l'essai et qu'il ne reste aucune déformation résiduelle, on dit que le corps a un comportement parfaitement élastique.

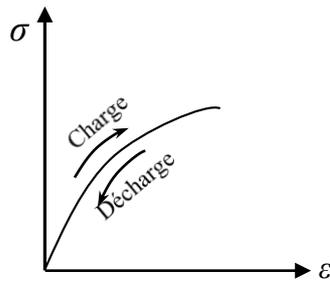


Figure I.3. Diagramme contrainte-déformation pour un matériau élastique.

De nombreux corps soumis à des charges peu élevées ont un comportement presque élastique et la déformation est approximativement proportionnelle à la contrainte. Si l'on reporte les mesures sur un diagramme contrainte (σ) et déformation (ϵ), on obtient une ligne droite. Ce type de déformation est appelée élasticité linéaire.

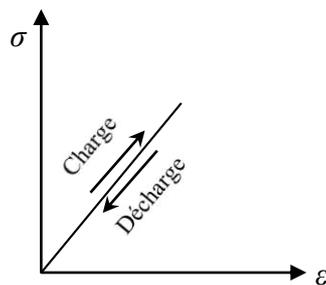


Figure I.4. Déformation élastique linéaire.

b) Déformation plastique :

La déformation est dite plastique, si après décharge le corps ne reprend pas les mêmes formes qu'il avait avant l'essai, il reste quelques déformations. Cette déformation est appelée aussi déformation résiduelle.

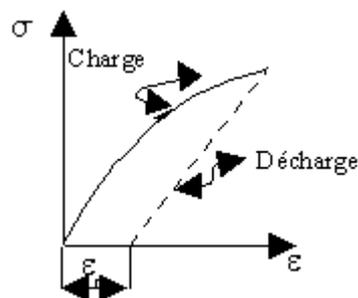


Figure I.5. Diagramme contrainte-déformation pour un matériau plastique.

c) Le fluage

Lorsqu'un corps est soumis à l'action prolongée (continue) d'une force, la déformation instantanée apparaissant lors de la mise en charge est suivie d'une déformation différée lente à laquelle on donne le nom de fluage.

Le fluage correspond à une déformation croissante dans le temps sous contrainte constante.

4.2.2. La résistance mécanique

C'est le pouvoir d'un matériau de résister à la destruction sous l'action des contraintes dues à une charge. Cette propriété des matériaux est l'objet d'une discipline scientifique dite RDM.

Les charges courantes qui sollicitent les matériaux sont : la compression, traction, choc.....

Les matériaux pierreux (granite, béton) résiste bien à la compression et beaucoup moins (5 à 50fois) à la traction, la flexion et le choc. Le métal et le bois résiste bien à la fois à la compression, traction et la flexion.

a) Détermination de la résistance mécanique

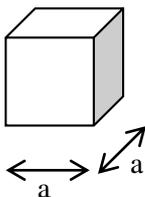
La résistance limite des matériaux de construction se caractérise par la contrainte correspondant à la charge entraînant la destruction de l'éprouvette du matériau étudié.

$$R = \frac{P}{S} \text{ (MPa)} \quad \text{(I.11)}$$

P : charge à la rupture en (N)

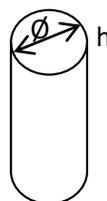
S : section de l'éprouvette en (mm).

La résistance à la compression s'établie expérimentalement sur des éprouvettes mises sous presse mécanique, elles ont une forme cubique de 10 à 20 cm de côté. Parfois on les utilise sous forme cylindrique avec $h = 2\varnothing$, ou prismatique avec $h = 4$ fois le coté de prisme.



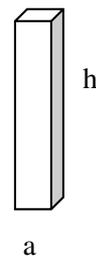
$a = 10, 15, 20 \text{ cm}$

$$R = \frac{P}{a^2}$$



$\varnothing = 15, 16 \text{ cm} \quad h = 30, 32 \text{ cm}$

$$R = \frac{4P}{\pi\varnothing^2}$$



$a = 10, 15, 20 \text{ cm} \quad h = 40, 60, 80 \text{ cm}$

$$R = \frac{P}{a^2}$$

La résistance d'un matériau dépend de sa structure, de sa masse volumique, de l'humidité et de la direction d'application de la charge ainsi que de sa forme et de ses dimensions.

Pour l'essai de flexion on prend des éprouvettes en forme de petites poutres (prismatique) reposons sur 2 appuis et soumise soit à une charge concentrée soit à 2 charges concentrées que nous augmentons jusqu'à rupture.

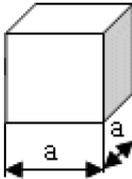
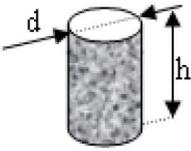
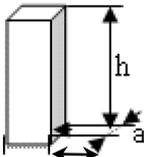
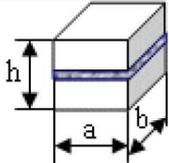
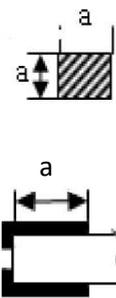
Echantillon	Schéma	Formule de calcul	Matériaux testés	Dimension des échantillons (cm)
Cube		$R = \frac{P}{a^2}$	Béton Mortier Roche	15 x 15 x 15 7.07 x 7.07 x 7.07 10 x 10 x 1 15 x 15 x 15 20 x 20 x 20
Cylindre		$R = \frac{4P}{\pi \phi^2}$	Béton Mortier Roche	D = 15 h= 30
Prisme		$R_{pr} = \frac{P}{a^2}$	Béton Bois	a=10; 15; 20 h=40; 60; 80 a=2; h=3
Echantillons assemblés		$R = \frac{P}{S}$	Brique	a=12; b=12 h=14
Moitié d'échantillon de mortier normalisé		$R = \frac{P}{S}$	Ciment	a = 4 cm

Tableau I.2. Schéma et méthode de détermination de la résistance à la compression.

Essai de résistance en traction				
Cylindrique prismatique		$R_t = \frac{4P}{\pi d^2}$ $R_t = \frac{P}{a^2}$	Béton Armature	5x5x50 10x10x80 d=1; l=5; l≥10
Cylindrique		$R_{tf} = \frac{P}{\pi dl}$	Béton	d=15; l=30 d=16; l=32

Tableau I.3. Schéma et méthode de détermination de la résistance à la traction.

b) Limite d'élasticité :

Contrainte appliquée nécessaire pour causer la déformation plastique permanente d'un matériau. Noté R_e .

c) Résistance à la rupture :

Contrainte appliquée nécessaire pour causer la rupture d'un matériau. Noté R_p

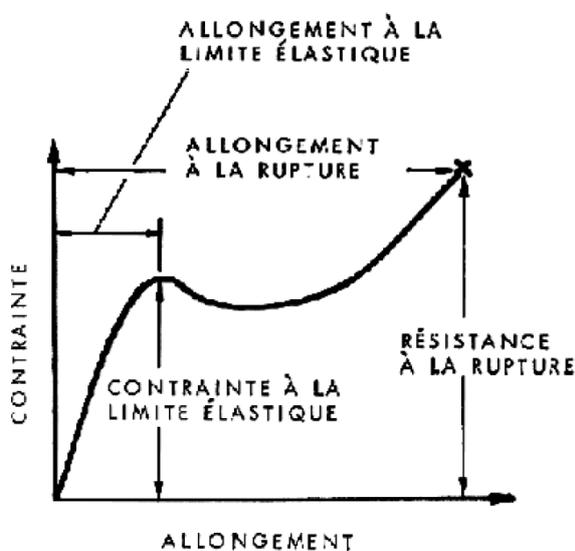


Figure I.5. Diagramme contrainte-déformation d'un matériaux.

4.2.3. Module d'élasticité ou de Young :

C'est la propriété habituellement utilisée pour caractériser la rigidité. Plus cette valeur est grande plus le matériau nécessite d'efforts pour être déformé. Noté E et exprimé en N/mm^2 ou MPa ou Bar .

$$E = \operatorname{tg} \alpha = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (\text{I.11})$$

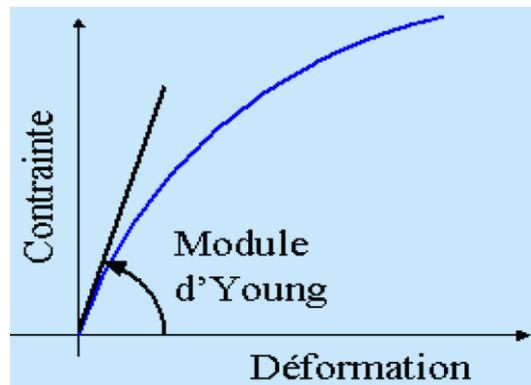


Figure I.6. Détermination du module d'élasticité.



CHAPITRE 2

LES GRANULATS



CHAPITRE 2 : LES GRANULATS

1. Introduction

Les granulats utilisés dans la construction proviennent des roches. Ils sont extraits dans des carrières où la roche est concassée, broyée et criblée pour avoir les différentes classes des granulats.



Figure II.1. Extraction des roches pour granulats de carrière.

Dans la nature, il existe principalement trois catégories de roches :

(a) Les roches éruptives : ou les roches magmatiques (littéralement nées avec ou par le feu) constituent la majeure partie des roches continentales et océaniques. Elles se sont formées à partir du magma fondu venu du fond de la terre et durci pendant son refroidissement :

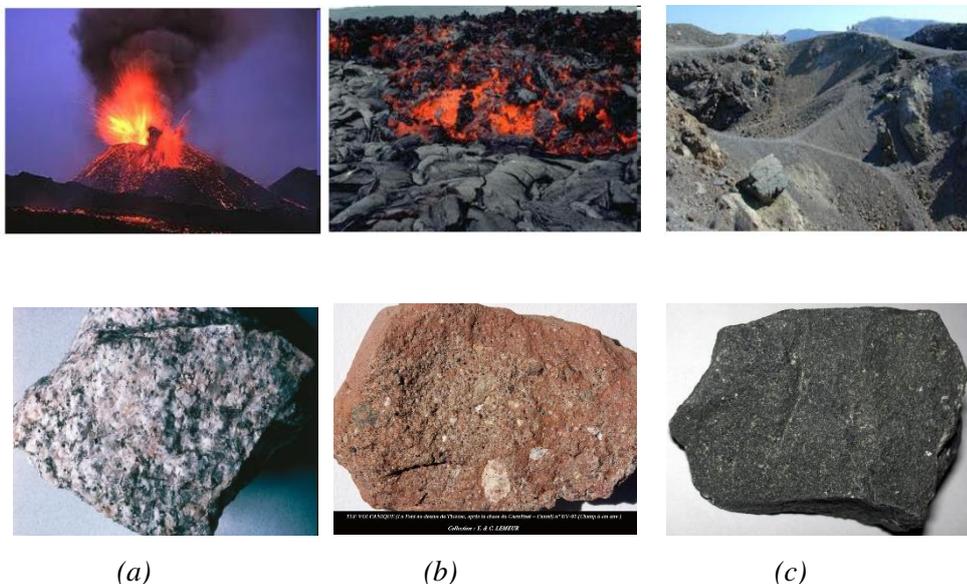
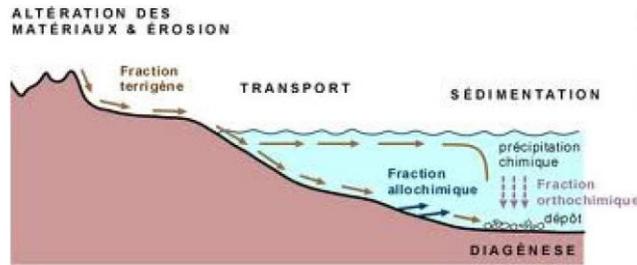


Figure II.2. Exemples des roches éruptives : (a) Granite, (b) Tuf volcanique et (c) Basalte.

(b) Les roches sédimentaires : proviennent de la consolidation de sédiments ou de la précipitation des minéraux en solution, on distingue : les roches sédimentaires chimiques, organiques et mécaniques.



(a)



(b)

Figure II.3. Exemples des roches sédimentaires : (a) Grès et (b) Calcaire.

(c) Les roches métamorphiques : se sont formées par transformation des roches éruptives ou sédimentaires sous l'influence de hautes températures et pressions et parfois de réactions chimiques.

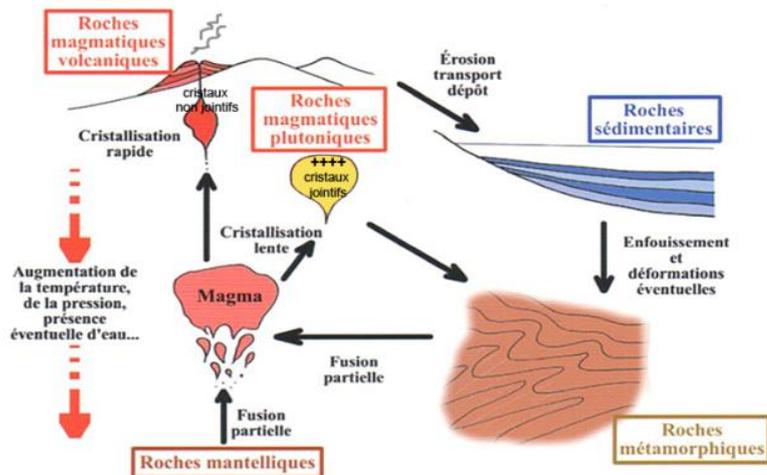


Figure II.4. Cycle des roches.

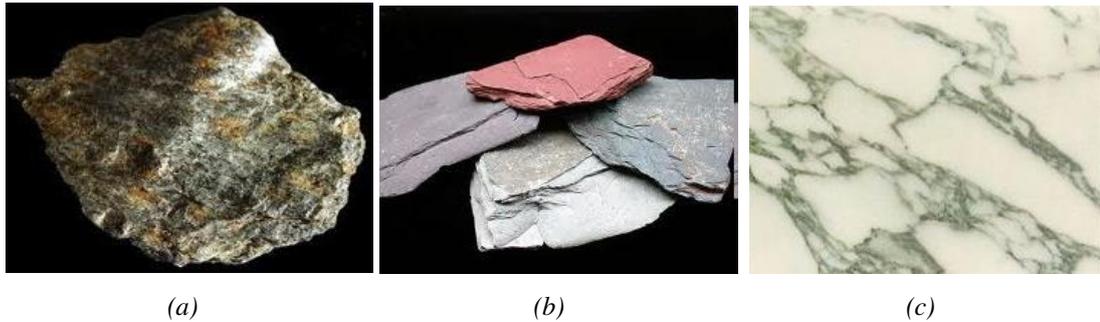


Figure II.5. Exemples des roches métamorphiques : (a) Schiste, (b) Ardoise et (c) Marbre.

2. Définition

Les granulats sont définis comme un ensemble de grains minéraux inertes, de dimensions comprises entre 0 et 125 mm, destinés à la confection des mortiers, des bétons, etc....

Les granulats sont des constituants essentiels des bétons qui conditionne à la fois leurs caractéristiques tant mécanique (résistance) que physique (densité) que leur coût. Ils constituent le squelette du béton et ils représentent, dans les cas usuels, environ 80 % du poids total du béton.

Les granulats sont nécessaires pour la fabrication des bétons ; du point de vue économique, car ils permettent de diminuer la quantité de liant qui est plus cher ; du point de vue technique, car ils augmentent la stabilité dimensionnelle (retrait, fluage) et ils sont plus résistants que la pâte de ciment.

Il faut par conséquent, augmenter au maximum la quantité de granulats, en respectant toutefois les deux conditions suivantes :

- Les granulats doivent satisfaire à certaines exigences de qualité
- La quantité de pâte liante doit être suffisante pour lier tous les grains et remplir les vides.

3. Différents types de granulats

Les granulats utilisés pour le béton sont soit d'origine naturelle, soit artificielle.

3.1. Les granulats naturels

On classe les granulats en deux catégories :

- a) Les granulats alluvionnaires : dits roulés, dont la forme a été acquise par l'érosion. Ces granulats sont lavés pour éliminer les particules argileuses, nuisibles à la résistance du béton et criblés pour obtenir différentes classes de dimension. Bien qu'on puisse trouver différentes roches selon la région d'origine, les granulats utilisés pour le béton sont le plus souvent siliceux, calcaires ou silico-calcaires.

Ce sont notamment :

- Les sables, graviers et cailloux issus des rivières ;
- Le sable de mer ;
- Sable éolien de dunes.



Figure II.6. *Granulats alluvionnaires.*

- b) Les granulats de carrière : sont obtenus par abattage et concassage de la roche, ce qui leurs donnent des formes angulaires. Une phase de précriblage est indispensable à l'obtention de granulats propres. Différentes phases de concassage aboutissent à l'obtention des classes granulaires souhaitées.

Les granulats concassés présentent des caractéristiques qui dépendent d'un grand nombre de paramètres : origine de la roche, degré de concassage ...etc.



Figure II.7. *Granulats de carrière.*

3.2. Les granulats artificiels :

- Sous-produits industriels, concassés ou non

Les plus employés sont le laitier de haut fourneau obtenus par refroidissement à l'eau. Ces granulats sont utilisés notamment dans les bétons routiers.



Figure II.8. *Laitier granulé de haut fourneau*



Laitier concassé de haut fourneau.

- 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, ...).



Figure II.9. *Granulats ferreux.*

- Les granulats très légers

Ils sont d'origine aussi bien végétale et organique que minérale (bois, polystyrène expansé). Très légers - 20 à 100 kg/m³ - ils permettent de réaliser des bétons de masse volumique comprise entre 300 et 600 kg/m³. On voit donc leur intérêt pour les bétons d'isolation, mais également pour la réalisation d'éléments légers: blocs coffrant, blocs de remplissage, dalles, ou rechargements sur planchers peu résistants.

4. Classification des granulats

4.1. Selon la granularité :

Les granulats sont classés en fonction de leur granularité déterminée par analyse granulométrique sur des tamis de contrôle à mailles carrées dans la série normalisée (voir paragraphe 5.1).

Ils sont désignés par d et D qui représentent respectivement la plus petite et la plus grande des dimensions de l'appellation commerciale des produits. Ils sont appelés d/D ou $0/D$ lorsque d est inférieur à 2 mm.

Les intervalles d/D et $0/D$ sont également appelés classes granulaires.

Famille de granulats

- Fillers $0/D$ où $D \leq 0.08 \text{ mm}$,
- Sables $0/D$ où $D \leq 6.3 \text{ mm}$,
- Sablons $0/D$ où $D \leq 1 \text{ mm}$
- Gravillons d/D où $d \geq 2 \text{ mm}$ et $D \leq 31.5 \text{ mm}$,
- Cailloux d/D où $d \geq 20 \text{ mm}$ et $D \leq 125 \text{ mm}$,
- Graves $0/D$ où $D > 6.3 \text{ mm}$.

4.2. Selon la densité :

Selon la densité des granulats, On peut distinguer :

Granulats légers : masse volumique $\gamma < 2 \text{ t/m}^3$

Granulats courants : masse volumique $2 \text{ t/m}^3 \leq \gamma \leq 3 \text{ t/m}^3$

Granulats lourds: masse volumiques $\gamma > 3 \text{ t/m}^3$

5. Les caractéristiques principales des granulats

5.1. Caractéristiques géométriques

a) Granulométrie

Lors de la formulation d'un béton, généralement on souhaite obtenir un béton résistant, étanche et durable.

Pour atteindre ce but, il faut :

- Que le béton à l'état frais soit facile à mettre en œuvre et à compacter
- Un maximum de granulats par unités de volume (pour réduire la quantité de pâte liante nécessaire pour remplir les vides)
- un maximum de surface spécifique du liant pour améliorer son hydratation.

Par ailleurs

- Il faut choisir D_{max} aussi grand que permet la dimension minimum de la pièce à bétonner et l'encombrement des granulats,
- La proportion de chaque dimension des grains doit être choisie de façon à remplir les vides laissés par les grains de dimensions supérieures.

Les courbes granulométriques apportant quelques éléments de réponses à ces conditions.

La granulométrie est la détermination des dimensions des grains. Elle permet de déterminer l'échelonnement des dimensions des grains contenus dans un volume de granulat.

Elle consiste à tamiser le granulat sur une série de tamis à mailles carrées ou de passoire (trous circulaires), de dimensions d'ouverture décroissantes et à peser le refus sur chaque tamis ou passoire. Les ouvertures carrées des tamis sont normalisées et s'échelonnent de 0.08 mm à 80 mm.

Soit on utilise le diamètre du tamis ou bien le module selon la relation suivante :

Le module algébrique arrondi est le produit par 10, arrondi à l'entier le plus proche, du logarithme décimal de la dimension exprimée en micromètres (μm). Soit :

- $D_n (\mu m)$ est le diamètre de tamis, « le module M_n » est « Le module algébrique arrondi » + 1.

$$M_n = 10 \log D_n + 1 \quad (II-1)$$



Figure II.10. Série de tamis avec une tamiseuse électronique.

La courbe granulométrique exprime les pourcentages cumulés, en poids, de grains passant dans les tamis successifs.

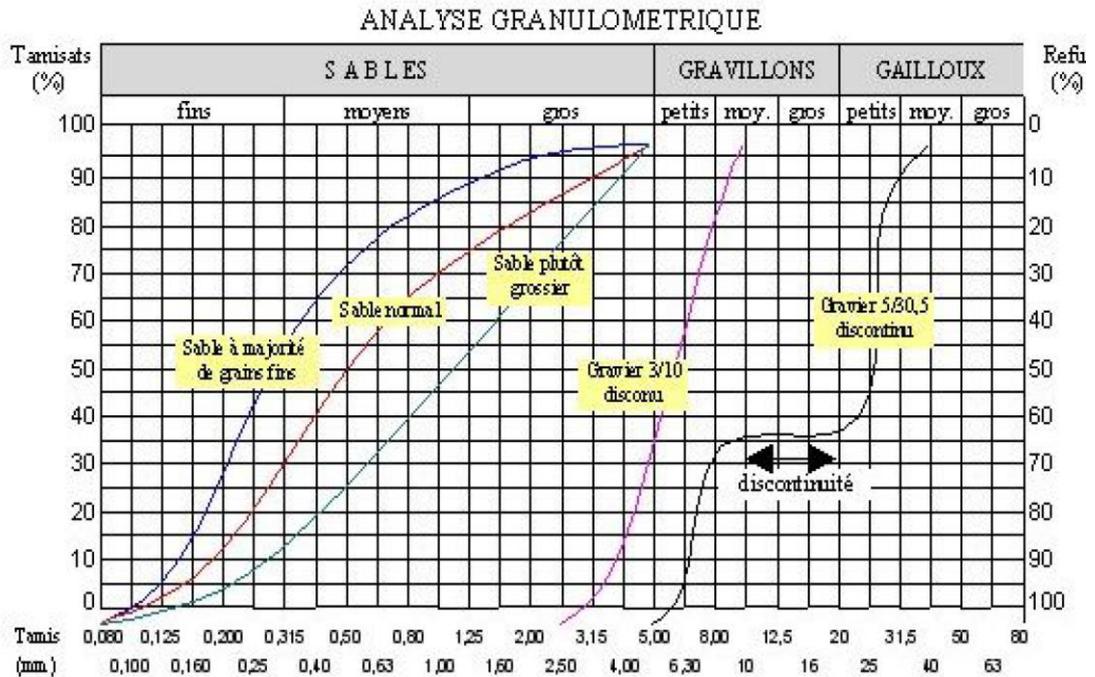


Figure II.11. Courbes granulométriques dans différents cas.

Les courbes granulométriques apportent les renseignements suivants :

- Les limites d et D du granulat en question (sable, gravier,..)
- La proportion d'éléments fins (sable normal, sable fin ou sable grossier)
- La continuité ou la discontinuité de la granularité ; la discontinuité n'affecte pas la résistance du béton mais affecte l'ouvrabilité du béton.

Module	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29
Tamis	0,08	0,10	0,125	0,160	0,300	0,230	0,315	0,40	0,50	0,63
Module	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39
Tamis	0,80	1,00	1,25	1,60	2,00	2,50	3,15	4,00	5,00	6,30
Module	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49
Tamis	8,00	10,00	12,50	16,00	20,00	25,00	31,50	40,00	50,00	63,00
Module	50									
Tamis	80,00									

Tableau II.1. Tamis normalisés et leurs modules utilisés pour l'essai analyse granulométrique.

- Module de finesse

Les sables doivent présenter une granulométrie telle que les éléments fins ne soient ni en excès, ni en trop faible proportion.

Selon la Norme Française [NFP 18-540], Le module de finesse est très utilisé pour caractériser des sables à béton par un seul chiffre : c'est le $1/100$ de la somme des refus en pourcentage sur les différents tamis de la série suivante : $0.16 - 0.315 - 0.63 - 1.25 - 2.5 - 5$.

$$Mf = \frac{1}{100} \sum \text{Refus cumulés en \% des tamis } \{0.16 - 0.315 - 0.63 - 1.25 - 2.50 - 5\} \quad (\text{II-2})$$

Il permet de juger globalement de la granularité d'un sable : un module de finesse élevé indique un sable grossier, un module faible caractérise un sable fin.

- Mf de 1.80 à 2.20 : Sable un peu trop fin (recherche de facilité de mise en œuvre au détriment probable de la résistance),
- Mf de 2.20 à 2.80 : Sable préférentiel (ouvrabilité satisfaisante et une bonne résistance avec des risques de ségrégation limités),
- Mf de 2.80 à 3.20 : Sable un peu trop grossier (recherche de résistance élevée mais on aura, en général, une faible ouvrabilité et des risques de ségrégation).

- Correction du module de finesse du sable :

La reconstitution (correction) des sables peut se faire expérimentalement en mélangeant au sable principal le sable d'ajout en proportion croissante jusqu'à obtenir un mélange constituant un sable donnant au béton les qualités recherchées. La connaissance des Mf des sables composants et celui que l'on désire obtenir permet de résoudre le problème directement par la règle d'*Abrams*.

Soit :

- Un sable grossier S_1 de module de finesse Mf_1
- Un sable fin S_2 de module de finesse Mf_2
- Le sable de mélange S de module de finesse souhaité Mf

D'où les proportions en sable S_1 et en sable S_2 seront comme suit :

- Proportion en sable S_1 :

$$S_1(\%) = \frac{Mf - Mf_2}{Mf_1 - Mf_2} \quad (\text{II-3})$$

- Proportion en sable S_2 :

$$S_2(\%) = \frac{Mf_1 - Mf}{Mf_1 - Mf_2} \quad (\text{II-4})$$

Exemple : déterminer le module de finesse du sable, dans l'analyse granulométrique est présentée dans le tableau suivant

Tamis (mm)	Refus partiel (g)	Refus cumulé (g)	Refus cumulé (%)	Tamisât cumulé (%)
6	0	0	0	100
5	75	75	7.5	92.5
4	30	105	10.5	89.5
3.15	16	121	12.1	97.9
2.5	124	245	24.5	75.5
1.25	250	495	49.5	50.5
0.63	220	715	71.5	28.5
0.315	193	908	90.8	9.2
0.16	87	995	99.5	0.5
0.08	5	1000	100	0

- Faire la correction avec un 2eme sable fin $Mf_2 = 2.0$ pour avoir un sable préférentiel $Mf = 2.5$.

La solution

$$Mf = \frac{1}{100} \sum \text{Refus cumulés en \% des tamis } \{0.16 - 0.315 - 0.63 - 1.25 - 2.50 - 5\} = 3.43$$

Donc c'est un sable grossier.

Pour avoir un sable préférentiel $Mf = 2.5$, les proportions en sable fin S_1 et en sable grossier S_2 seront déterminées comme suit :

- Proportion en sable S_1 :

$$S_1(\%) = \frac{2.5 - 2}{3.43 - 2} \times 100 = 35\%$$

- Proportion en sable S_2 :

$$S_2(\%) = \frac{3.43 - 2.5}{3.43 - 2} \times 100 = 65\%$$

- Forme des granulats :

La forme des granulats est mesurée par le coefficient d'aplatissement A : plus celui-ci est élevé, plus le gravillon contient de grains plats, allongés ou en aiguilles qui rendent le malaxage et la mise en œuvre difficiles.

La forme d'un granulat est définie par trois grandeurs géométriques (figure II.12) :

- 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.

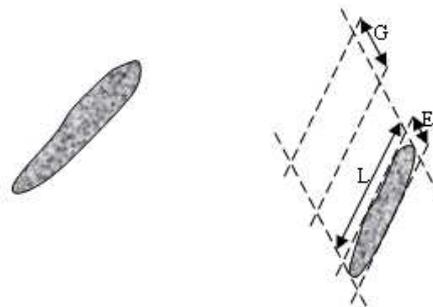


Figure II.12. *Forme d'un granulat.*

Le coefficient d'aplatissement A d'un ensemble de granulats est le pourcentage pondéral des éléments qui vérifient la relation :

$$\frac{G}{E} > 1.58$$

La forme des granulats influence :

- La facilité de mise en œuvre et le compactage du béton
- La compacité du mélange,

L'état de surface des grains influence :

- La compacité du mélange.
- L'adhérence du granulat à la pâte de ciment.

Quoi qu'il en soit, la forme optimale pour les grains est celle qui se rapproche le plus

- de la sphère, pour les matériaux roulés,
- de cube pour les matériaux broyés.

5.2. *Caractéristiques physiques :*

5.2.1. Masse volumique

a) Masse volumique apparente :

Les granulats courants pour bétons hydrauliques ont des masses volumiques apparente comprise entre 1400 et 1600 kg /m³.

b) Masse volumique absolue :

Les granulats courants pour bétons hydrauliques ont des masses volumiques absolues comprise entre 2500 et 2700 kg /m³.

5.2.2. Propreté des granulats (teneur en fines argileuses) :

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

La propreté désigne : la teneur en fines argileuses ou autres particules adhérentes à la surface des grains, ce qui se vérifie sur le chantier par les traces qu'elles laissent lorsqu'on frotte les granulats entre les mains.

- Dans le cas des cailloux ou gravillons la teneur en fines = % de passant à 0.5mm (tamisage effectué sous l'eau)

Ce pourcentage est limité selon la réglementation en vigueur à 2 %. Pour les graviers concassés, on tolère exceptionnellement un pourcentage en fine de 5 %.

- Dans le cas des sables : Essai de l'équivalent de sable

L'essai consiste à séparer la sable des particules très fines qui remonte par floculation à la partie supérieure de l'éprouvette ou à effectuer le lavage.

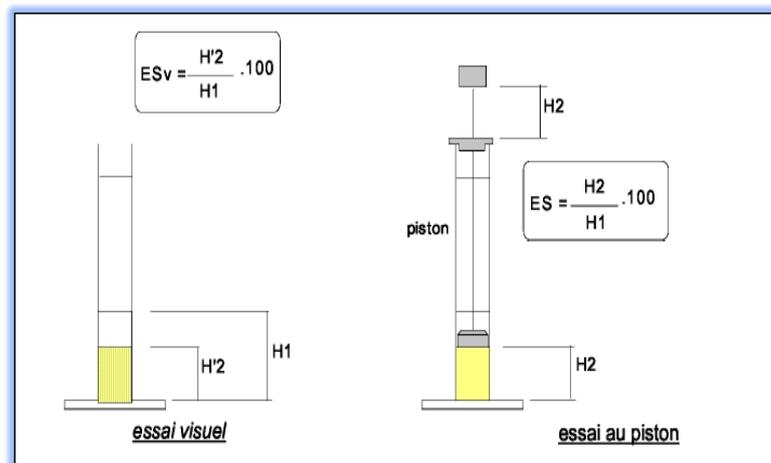


Figure II.13. Essai d'équivalent de sable.

où

H2 : hauteur totale du sable mesurée en utilisant le piston.

H'2 : hauteur totale du sable mesurée visuellement en utilisant une règle.

E_{sv} : équivalent de sable visuel

E_s : équivalent de sable visuel

Les Valeurs préconisées par la norme (NF P 18-598) pour déterminer la nature et la qualité du sable sont illustrées dans le tableau II.2.

E_{sv}	E_s	Nature du sable	Qualité du sable
< 65	< 60	Sable argileux	Risque de retrait ou de gonflement, à rejeter pour des bétons de qualité
$65 \leq E_{sv} \leq 75$	$60 \leq E_s \leq 70$	Sable largement argileux	De propreté admissible pour le béton de qualité
$75 \leq E_{sv} \leq 85$	$70 \leq E_s \leq 80$	Sable propre à faible de fines	Convenant parfaitement pour les bétons de qualité
$E_{sv} \geq 85$	$E_s \geq 80$	Sable très propre	Risque d'entraîner un défaut de plasticité

Tableau II.2. Valeurs de l'équivalent de sable.

5.2.3. Teneur en eau :

Cette mesure est d'une grande importance lors de la confection d'un béton. En effet si les granulats sont mouillés et en particulier le sable, la formulation du béton doit être modifiée pour tenir compte de cet apport d'eau et du manque de granulat.

Exemple de ce que peut contenir un granulat en eau :

apparence	Eau d'apport (l/m ³)			
	Sable (0/5)	Gravier (6.3/16)	Gravier (6.3/25)	Gravier (20/40)
Sèche	10 à 20	Négligeable	Négligeable	Négligeable
Humide	20 à 60	20 à 40	10 à 30	10 à 20
Très humide	80 à 100	40 à 60	30 à 50	20 à 40
Saturée	120 à 140	60 à 80	50 à 70	40 à 60

Tableau II.3. Exemple de ce que peut contenir un granulat en eau selon leur classe.

La méthode de mesure consiste à prélever une quantité donnée de granulats mouillés, de faire évaporer cette eau à une température de 105 °C et de peser la quantité de granulats secs. La différence de ces deux pesées définit la quantité d'eau évaporée, d'où la teneur en eau :

$$W = \frac{M_h - M_s}{M_s} \times 100\% \quad (\text{II-5})$$

où

M_{sec} est la masse sèche d'échantillon (après passage à l'étuve à 105C°)

M_h est la masse humide d'échantillon.

5.2.4. Foisonnement

Le volume occupé par poids donné de sable sec augmente en même temps que son humidité. Ce phénomène peut donc avoir une influence importante lorsque le dosage du béton est réalisé, non pas en poids, mais en volume.

Nous appellerons donc coefficient de foisonnement f (exprimé en %) l'augmentation de volume correspondant à une humidité donnée, par rapport au volume occupé par la même quantité de sable mais à l'état sec :

$$f = \frac{V_{\text{humide}} - V_{\text{sec}}}{V_{\text{sec}}} \%$$

Ce coefficient de foisonnement est d'autant plus important que le sable est plus fin.

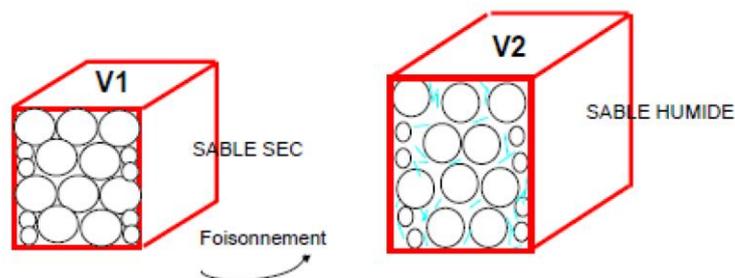


Figure II.14. Foisonnement du sable.

5.3. Caractéristiques mécaniques

5.3.1. Essai Micro Deval

C'est un essai dont le principe est de reproduire, dans un cylindre en rotation, des phénomènes d'usure. Le degré d'usure est apprécié par détermination de proportion d'éléments fins inférieurs à 1,6mm générés au cours de l'essai

Le coefficient Micro-Deval est par définition égal au rapport :

$$\text{MDE} = \frac{m}{M} \times 100 \% \quad (\text{II.6})$$

M : masse de l'échantillon

m : masse du tamisât au tamis de 1,6 mm

Le coefficient mesure le pourcentage d'usure, plus il est petit et plus la résistance à l'usure est grande.



Figure II.15. *Machine de Micro Deval.*

5.3.2. Essai 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.

Le coefficient Los Angeles calculé à partir du passage au tamis de 1,6 mm, mesuré en fin d'essai, caractérise le granulat.

Le coefficient Los Angeles LA est déterminé par la formule suivante :

$$\text{LA} = \frac{m}{M} \times 100 \% \quad (\text{II-7})$$

M : masse de l'échantillon

m : masse du tamisât au tamis de 1,6 mm

Selon la norme : $\text{LA} \leq 40 \%$



Figure II.16. *Machine de Los Angeles.*

5.3. Propriétés Chimiques

5.3.1. 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.

5.3.2. 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'alcali-réaction peuvent provoquer un gonflement du béton. Les granulats sont désignés comme étant non réactifs (NR), potentiellement réactifs (PR) ou potentiellement réactifs à effet de pessimum (PRP).

L'alcali-réaction doit donc être prévue et détectée pour éviter le faïençage ou l'éclatement.

5.3.3. 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 (SO_3) 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 soufre 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.

6. Les principales opérations effectuées pour l'élaboration des granulats concassés

Les caractéristiques géométriques (granularité, forme) et de propreté des granulats dépendent du processus d'élaboration dans les installations de traitement :

- L'extraction

L'ensemble des opérations d'extraction de la roche dans le gisement peut être défini dans un plan d'exploitation qui traite :

- de la reconnaissance du gisement,
- de l'enlèvement de la découverte,
- des méthodes d'extraction,
- de l'homogénéisation des produits extraits.

- Le concassage et le broyage

La fragmentation des matériaux se fait par concassage et broyage. Les producteurs de granulats appellent concassage la fragmentation grossière et broyage l'élaboration de sables, petits gravillons et fillers.

- Le criblage

C'est l'opération qui permet de séparer et de classer un ensemble de grains $0 / D_n$ provenant de l'extraction et / ou du concassage en sous ensemble $0 / D_i$ ou d_i / D_i .

- Le lavage des granulats

Il a pour but d'éliminer les éléments de pollution et l'excès de fines. On peut suivant le degré et le type de pollution faire :

- un lavage après extraction,
- un lavage sur crible sur le tout-venant et / ou les gravillons,
- un lavage sur sable en fin de parcours.

- Le défanage à sec

Il a pour but d'éliminer par voie sèche l'excès de fines de broyage des sables. Il ne peut se faire que sur des produits secs et très peu pollués par de l'argile.



CHAPITRE 3

LES LIANTS



CHAPITRE 3 : LES LIANTS

1. Introduction

Les liants minéraux sont des matériaux moulus d'une façon très fine. Malaxés à l'eau, ils donnent une pâte collante qui durcit graduellement pour devenir une pierre artificielle. Dans les travaux de construction, les liants minéraux sont mélangés avec l'eau et/ou les granulats (sable, gravillon, gravier), pour devenir une pâte de ciment ou mortier ou encore béton. Il est connu que certains liants durcissent à l'air seulement et d'autres dans des milieux humides ou dans l'eau. Cette propriété nous permet de classer les liants minéraux en :

- Liants aériens : qui ne durcissent et ne peuvent conserver leurs propriétés mécaniques qu'à l'air (ex.: chaux grasse, plâtre),
- Liants hydrauliques : qui durcissent et conservent leurs propriétés mécaniques non seulement à l'air mais aussi dans l'eau (ex. : chaux hydraulique, ciment Portland,...)

2. Liants aériens (Chaux grasse)

La chaux grasse a été l'un des premiers liants utilisés depuis des millénaires. Les chinois, les égyptiens ont construit des édifices durables avec des mortiers à base de chaux. Au moyen âge, la chaux a été des plus employée (mélangée avec des tuiles ou des briques pilées); ainsi elle est couramment utilisée jusqu'au milieu du 19ème siècle. La chaux, obtenue par cuisson de roches calcaires (CaCO_3) ou dolomitiques (association de CaCO_3 et MgCO_3) suivie d'une extinction à l'eau, durcissait lentement à l'air, ce qui lui a valu son appellation couramment employée de chaux aérienne.



Figure III.1. Chaux aérienne.

2.1. Propriétés principales de la chaux grasse

a) Physiques

- Le refus au tamis de 800 μ est nul et le refus au tamis de 80 μ doit être inférieur à 10%.
- La finesse globale doit se situer dans l'intervalle de 8.000 à 20.000 cm²/g.
- La masse volumique apparente varie de 500 à 700 kg/m³ et la masse volumique absolue varie de 2200 à 2500 kg/m³.
- La résistance réfractaire de la chaux aérienne varie entre 1800 à 2000 °C.
- La chaux aérienne prend lentement. Le temps de début de prise est de 600 minutes (10 heures).

b) Chimiques :

- la teneur en chaux libre et magnésie (CaO et MgO) doit être supérieure à 80%.
- La teneur en oxyde de carbone (CO) doit rester inférieure à 5%.

2.2. Utilisation de la chaux grasse dans le bâtiment

a) Enduits :

On distingue principalement deux fonctions : protection et esthétique. Les mortiers de chaux présentent une grande élasticité, ce qui permet d'éviter les fissures de retrait et faïençage. Les mortiers de chaux, une fois durcis, ont la propriété d'être imperméable à l'eau tout en étant perméable à l'air, afin d'assurer la respiration du mur.

b) Mortiers de pose et de jointement :

La force de liaison d'un mortier de pose est plus importante que sa résistance à la compression. Les mortiers de chaux qui développent cette adhérence grâce à leur plasticité, sont ainsi bien adaptés à cet emploi. Ils sont de surcroît peu perméables à l'eau et peu fissurables. Ils ne provoquent pas d'efflorescences. Les mortiers de chaux constituent de très bons mortiers de jointement de maçonneries en pierres tendres, en béton cellulaire ou en briques. Ils sont également très utilisés dans les travaux de bâtiments.

3. *Liants hydraulique (ciment portland)*

3.1. *Définition*

Le ciment est un liant hydraulique, c.-à-d. capable de faire prise dans l'eau. Il se présente sous l'aspect d'une poudre très fine qui, mélangée avec de l'eau, forme une pâte faisant prise et durcissant progressivement dans le temps.

Le ciment occupe la première place parmi les liants servant à lier les matières solides tels que les granulats et pierres.

3.2. *Bref historique du ciment*

Les Grecs sont les premiers constructeurs à employer la chaux obtenue par cuisson du calcaire. Et les Romains améliorent la technique de la chaux en y ajoutant des cendres volcaniques et des briques pilées et obtiennent ainsi un liant hydraulique, intermédiaire entre une chaux et un véritable ciment.

En 1817, le Français Louis Vicat, découvrit les principes chimiques des ciments et définit leurs règles de fabrication. Aussi en est-il considéré comme l'inventeur bien qu'il n'est pas déposé de brevet.

L'Anglais Joseph Aspdin fait breveter en 1824 le ciment "Portland", obtenu à partir d'un procédé de calcination combinant la cuisson de calcaire et d'argile dans des fours alimentés au charbon. La dénomination "Portland", due simplement à la similarité de couleur et de dureté avec la pierre de Portland (Sud de l'Angleterre), est à l'heure actuelle toujours employée dans l'industrie

4. *Fabrication du ciment*

Le constituant principal du ciment est le clinker qui est obtenu à partir de la cuisson d'un mélange approprié de calcaire (CaCO_3) et d'argile ($\text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3$), en proportion moyenne 80 % et 20 %.

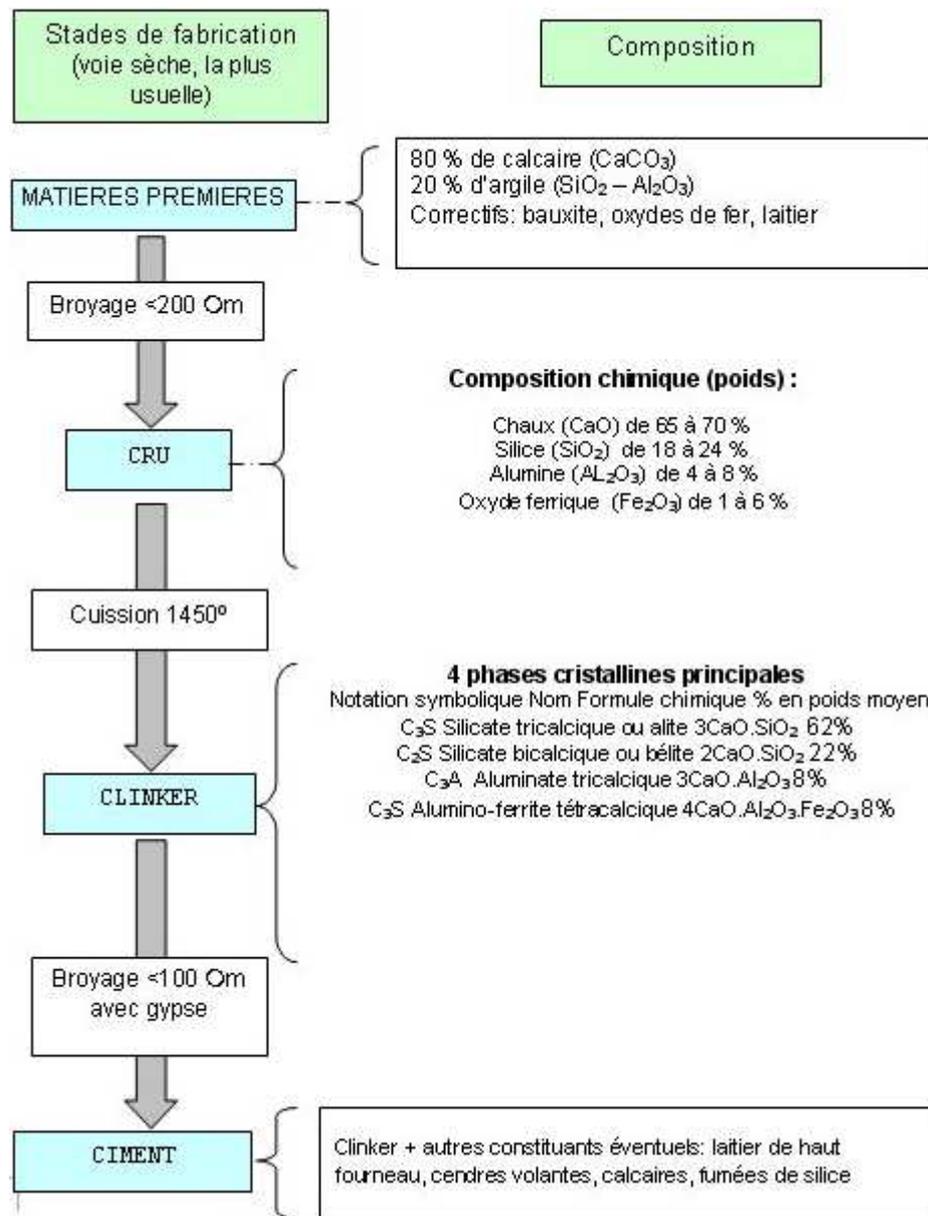


Figure III.2. Schéma de la fabrication du ciment.

4.1. Extraction

L'extraction consiste à extraire les matières premières vierges (comme le calcaire et l'argile) à partir de carrières naturelles à ciel ouvert. Ces matières premières sont extraites des parois rocheuses par abattage à l'explosif ou à la pelle mécanique. La roche est acheminée par des dumpers ou des bandes transporteuses vers un atelier de concassage.

4.2. Concassage

Les matériaux extraits des carrières présentant des granulométries grossières allant jusqu'au m^3 , le concassage effectué le plus souvent sur les lieux même de l'extraction a pour but d'en limiter la granulométrie à 50 mm, voire 100 mm au maximum.

4.3. Préparation du cru

Les grains de calcaire et d'argile sont intimement mélangés par broyage ou délayage, dans des proportions définies, en un mélange très fin, le « cru ».

La préparation du cru peut être réalisée suivant quatre procédés différents :

- La voie humide, pratiquement abandonnée parce que grande consommatrice d'énergie. Dans ce procédé, le calcaire et l'argile sont mélangés et broyés finement avec l'eau de façon, à constituer une pâte assez liquide (28 à 42% d'eau).pate qui est ensuite homogénéisée et stockée. Cette voie s'impose lorsque les matériaux extraits présentent un taux d'humidité élevé.
- La voie semi-humide qui consiste à filtrer la pate réalisée de façon analogue à la voie humide mais après filtration, a en faire des boudins qui sont ensuite cuits sur une grille.
- La voie semi sèche qui consiste à humidifier la poutre obtenue après broyage et séchage pour l'agglomérer sous forme de granules qui sont ensuite cuits sur une grille mobile.
- La voie sèche, la plus généralement utilisée, dont la matière première est préparée sous forme de poudre, la fabrication comporte les phases suivantes :

a) Pré-homogénéisation

La phase de pré-homogénéisation consiste à créer un mélange homogène. Cette opération peut être réalisée soit dans un hall un mélange préhomogène en disposant la matière en couches horizontales juxtaposées, puis en la reprenant verticalement avec une roue-pelle soit dans un silo vertical par brassage par air comprimé.

b) Broyage – séchage

Repris à l'aide de roues-pelles ou de gratteurs, le mélange précédent est envoyé à la station de broyage afin d'être réduit en une poudre de grains inférieurs à 160 microns.

c) Homogénéisation

C'est au cours de cette phase que grâce à un brassage pneumatique ou mécanique vigoureux, peut être obtenu un produit parfaitement homogène. Apte à être cuit.

4.4. Cuisson

Réalisée dans des fours rotatifs dont les dimensions les plus courantes sont de l'ordre de 5 m de diamètre et de 80 à 100 m de longueur (peut atteindre 200 m), à une température comprise entre 1400 et 1500 °C, la cuisson permet la transformation du cru en clinker, le cycle du traitement comportant les phases suivantes :

- Le préchauffage qui s'effectue dans un échangeur de chaleur situé à l'amont du four, les gaz chauds provenant du four y brassant la farine à contre-courant ;
- La décomposition des argiles qui se situe au dessus de 500 °C.
- La décarbonatation des calcaires qui s'effectue à 950 °C dans la partie médiane du four dont les températures sont comprises entre 550 et 1000 °C.
- La formation du clinker ou clinkérisation à 1450 °C qui s'effectue en partie aval du four près du brûleur.

4.5. Refroidissement

Cette opération a pour but d'abaisser la température du clinker qui est de l'ordre de 1200 à 1450 °C à la sortie du four à environ 50/250 °C.

Ce choc thermique donne naissance à des granules de diamètres variant entre 1 et 10 mm.

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

Le silicate tricalcique $3\text{CaO}.\text{SiO}_2$ (C_3S) : Alite (50-70% du clinker).

- Le silicate bicalcique $2\text{CaO}.\text{SiO}_2$ (C_2S) : Bélite (10-30% du clinker).
- L'aluminate tricalcique $3\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3$ (C_3A) : Céliste (2-15% du clinker).
- L'alumino-ferrite tétracalcique (Ferro-aluminate tétracalcique) $4\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3.\text{Fe}_2\text{O}_3$ (C_4AF) : Céliste (5-15% du clinker).

Les propriétés des ciments varient en fonction des pourcentages respectifs des différentes phases, c'est ainsi que :

- Le C_3S qui libère au cours de l'hydratation une quantité de chaleur voisine du double de celle libérée par le C_2S , donne au ciment une résistance rapide et élevée, cette phase est responsable des résistances aux premiers âges.

- Le C_2S permet au ciment d'atteindre des résistances élevées à moyen et long terme, à fort pourcentage, la chaleur d'hydratation dégagée par le phénomène de prise est plus faible.
- Le C_3A est la phase présentant la plus grande vitesse de réaction initiale d'où l'obtention de résistances initiale élevées. C'est la phase dont la réaction d'hydratation est la plus exothermique. De ce fait elle contribue essentiellement à la prise de la pâte de ciment alors qu'elle contribue assez peu à la résistance finale.
- Le C_4AF son rôle est mineur dans les réactions de durcissement du ciment.

4.6. Broyage

Il est réalisé en continu dans des broyeurs alimentés à partir des stocks de clinker et des différents constituants et ajouts.

Le broyage a pour objectif, d'une part de réduire les granules de clinker en poudre, d'autre part de procéder à l'ajout du gypse, ainsi qu'à celui des éventuels autres constituants (laitier, cendres...), ce qui permet d'obtenir les différents types de ciments normalisés.

Sous l'effet de la chaleur, les constituants de l'argile (silicates d'alumine et d'oxyde de fer), se combinent avec la chaux provenant du calcaire pour donner des silicates et aluminates de chaux.

4.7. Stockage

A la sortie du broyeur, le ciment est transporté vers des silos de stockage, pour être soit ensaché soit expédié en vrac.



Figure III.3. Stockage en sac du ciment.

5. Ajouts cimentaires

Le ciment portland est composé de clinker moulu auquel on ajoute des quantités d'ajouts afin de modifier ces propriétés hydrauliques, pouzzolaniques et physiques (accroissement de la compacité).

6. Classification et Caractéristiques des ajouts cimentaires

Selon la norme NF EN 206-1, il existe deux types d'addition :

6.1. Les additions de type I :

Ce sont des matériaux quasiment *inertes*, naturels ou synthétiques qui, par leur composition granulométrique, améliorent les propriétés physiques du ciment portland (maniabilité, Compacité etc...).

Parmi ces additifs on distingue :

a) Fillers

Ce sont des matières minérales obtenus par broyage de certaines roches (calcaires, Basaltes, laitiers, Bentonites, ...). Ils ne peuvent jamais excéder 5 % en masse dans la composition du ciment.

b) Calcaires (L; LL):

Il s'agit de calcaire finement broyé dont la quantité de carbone organique est limitée :

- L : $\leq 0,20\%$

- LL : $\leq 0,50\%$.

6.2. Les additions de type II :

Ce sont des matériaux finement broyés à caractère inorganique, pouzzolanique ou hydraulique latent. Parmi ces additifs on distingue :

a) Cendres volantes (V, W) *Fly ash* :

Elles sont obtenues par précipitation électrostatique ou mécanique de particules pulvérulentes contenues dans les fumées des chaudières alimentées au charbon pulvérisé. Les cendres volantes peuvent être de nature siliceuse (V) ou calcique (W).

b) Fumée de silice (D) :

Elle provient de la réduction de quartz de grande pureté par du charbon dans des fours à arc électrique. La proportion de fumée de silice dans le ciment est limitée à 10 % en masse, selon NA 442 et EN 197-1 (NA 442, 2000 ; EN 197-1, 1996).

c) Laitier *granulé* des hauts fourneaux (S) :

Obtenu par refroidissement rapide (trempe) du laitier fondu. Les particules de laitier, dont le diamètre est inférieur à 10 µm, contribuent à la résistance du béton aux jeunes âges. Les particules dont les diamètres sont compris entre 10 et 45 µm contribuent au développement des résistances ultérieures.

Les ciments aux laitiers résistent mieux aux agressions chimiques (attaques sulfatiques, chlorure).

d) Pouzzolanes naturelles (P, Q) :

Ce sont des substances naturelles siliceuses ou silico-alumineuses. Elles se présentent en deux sortes :

- Des substances d'origine volcanique (verre volcanique, ponce, rhyolite, tuf, zéolite).
- Des argiles et des schistes activés thermiquement (calcinés).

e) Métakaolin :

Le métakaolin est obtenu par calcination d'argile kaolinitique ($T^{\circ}= 650$ et 850 °C), suivie d'un broyage permettant d'atteindre une finesse très élevée. Le matériau obtenu présente une pouzzolanité élevée et peut être considéré comme une addition très active.

7. Types de ciments en fonction de leur composition

Les normes NA 442 et EN 197-1 définie cinq grands types de ciments courants. Ils sont classés en fonction de leur composition, Ils sont notés CEM et numérotés de 1 à 5 en chiffres romains dans leur notation européenne :

Le type informe sur les constituants entrant dans la composition du ciment et fixe les limites de leurs proportions.

7.1. Ciment portland CPA-CEM I

Constitué de 95 % à 100 % de clinker et de 0 à 5% de constituants secondaires.

7.2. *Ciment portland composé C.P.J-CEM II*

Contenant au moins 65 % de clinker, le reste étant l'un ou plusieurs de constituants secondaires suivant laitier, pouzzolane, cendre, filler....etc.

A l'heure actuelle le CPJ est le ciment le plus utilisé.

7.3. *Ciment de haut fourneau CHF-CEM III*

Les ciments de haut fourneau sont constitués d'un mélange de clinker et de laitier de haut fourneau granulé et broyé.

Il existe trois classes de ciment de haut fourneau, ces classes sont nommées ciments de haut fourneau CHF-CEM III /A, CHF-CEM III /B, C LK-CEM III /C.

Tous ces ciments peuvent comporter jusqu'à 5 % de filler, mais la différence est dans la proportion de laitier de haut fourneau granulé broyé, ces proportions sont les suivantes :

Classe du ciment	% du laitier
classe III / A	36 à 65 %
classe III / B	66 à 80 %
classe III / C	81 à 95 %

Tableau III.1. Teneur en laitier dans les ciments de haut fourneau.

7.4. *Ciment pouzzolanique CPZ-CEM IV*

IL existe deux classes de ciment pouzzolanique :

- la classe CPZ-CEM IV/A : dont le pourcentage en cendres ou pouzzolanes est compris entre 10 et 35%.
- la classe CPZ-CEM IV/B : dont le pourcentage en cendre ou pouzzolanes est compris entre 36 et 55%.

Le ciment pouzzolanique présente une faible résistance à 7 jours (de l'ordre de 12MPa), et à 28 jours (≈ 22.5 MPA). Il présente une certaine résistance aux attaques par les sulfates et les acides.

7.5. Ciment au laitier et aux cendres CLC-CEM V

Pour ce type de ciment, les deux autres constituants que le clinker sont le laitier et la pouzzolane ou cendre volante. Il existe deux types :

- CLC-CEM V / A: dont le pourcentage de la pouzzolane ou cendre volante est compris entre 18 et 30 %, et laitier entre 18% et 30 %
- CLC-CEM V / B: dont le pourcentage de la pouzzolane ou cendre volante est compris entre 31 et 50 % et laitier entre 31 et 50 %.

7.6. Autre types de ciment

a) Ciments alumineux fondus

Le ciment alumineux fondus est un liant hydraulique résulte de la cuisson jusqu'à fusion d'un mélange de calcaire et de bauxite, suivie d'une mouture sans gypse à une finesse comparable à celle des CPA. Il se caractérise par:

- son temps de prise est compris entre 150 minutes et 210 minutes mais, dès la fin de la prise, sa résistance à la compression, mesurée sur mortier préparé avec un rapport $E/C=0.40$ augmente très rapidement pour atteindre environ 40 MPA à 6 heures.

Utilisable dans les travaux nécessitant l'obtention, dans un délai très court, de résistances mécaniques élevées (poutres et linteaux pour le bâtiment, sols industriels, etc.).

b) Ciment prompt naturel

C'est un ciment qui résulte de la cuisson, à température modérée, d'un calcaire argileux de composition régulière, extrait de bancs homogènes, suivie d'un broyage très fin.

La composition minéralogique du ciment prompt naturel lui confère des propriétés particulières tels que :

- Une prise et un durcissement rapides,
- une imperméabilisation et de résistance aux eaux acides et aux eaux sulfatées.

8. Critères de choix du ciment

a) Le choix de la classe de résistance du ciment en fonction de la résistance du béton à 28 jours

Dans les formules de béton les plus simples, le ciment joue, au moins, deux rôles : il permet d'obtenir la résistance souhaitée, mais aussi, il apporte les éléments fins nécessaires pour un bon comportement du béton frais.

b) Impératifs de mise en œuvre

Un décoffrage rapide, une mise en précontrainte précoce orientent vers des ciments dont la classe de résistance au jeune âge est élevée.

Pour un bétonnage par temps froid, le béton reste plus longtemps mou et déformable, et le développement des résistances est retardé, on cherchera à bénéficier de ce dégagement de chaleur en choisissant des ciments de classe 42.5R, ou 52.5R (voir paragraphe 10 page 44). On raisonnera à l'inverse pour le bétonnage par temps chaud.

c) Environnement de l'ouvrage

Le béton doit dans sa formulation et ses caractéristiques, être adapté à l'environnement (sec, humide, milieu agressif...).

9. Les caractéristiques du ciment

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 »

9.1. Caractéristiques de la poudre

a) La surface spécifique (finesse Blaine)

L'hydratation du ciment commence sur la surface des grains, donc c'est la superficie totale des grains qui représente le matériau disponible pour l'hydratation. La vitesse d'hydratation dépend donc de la finesse des grains de ciment. Pour avoir une hydratation rapide et une résistance élevée à court terme, une finesse importante du ciment est exigée.

La surface spécifique permet de mesurer la finesse de mouture 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 cm^2/g . Suivant le type de ciment, cette valeur est généralement comprise entre 2 800 et 5 000 cm^2/g .

b) La masse volumique apparente

Elle représente la masse de la poudre par unité de volume (vides entre les éléments inclus). Elle est de l'ordre de 1 000 kg/m^3 (1 kg par litre) en moyenne pour le ciment.

c) La masse volumique absolue

Elle représente la masse de la poudre par unité de volume (vides entre les éléments exclus). Elle varie de 2 900 à 3 150 kg/m^3 suivant le type de ciment.

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

a) Le début de prise

Début et fin de prise : après une ou deux heures pour la plupart des ciments, on observe une augmentation brusque de la viscosité : c'est le début de prise, qui est accompagné d'un dégagement de chaleur. La fin de prise correspond au moment où la pâte cesse d'être déformable et se transforme en un matériau rigide.



Figure III.4. Schéma présentant le début et fin de prise du ciment.

Il est déterminé par l'instant où l'aiguille de Vicat (aiguille de 1 mm^2 de section pesant 300g) ne s'enfonce plus jusqu'au fond d'une pastille (disque) de pâte pure de ciment.

Début de prise correspond au temps écoulé depuis le gâchage de la pâte jusqu'au moment où l'aiguille s'arrête à une distance ($d = 4 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$) du fond de l'anneau de 40 mm de hauteur remplie de pâte pure de ciment.

De même la fin de prise correspond au moment où l'aiguille ne s'enfonce plus dans l'anneau.

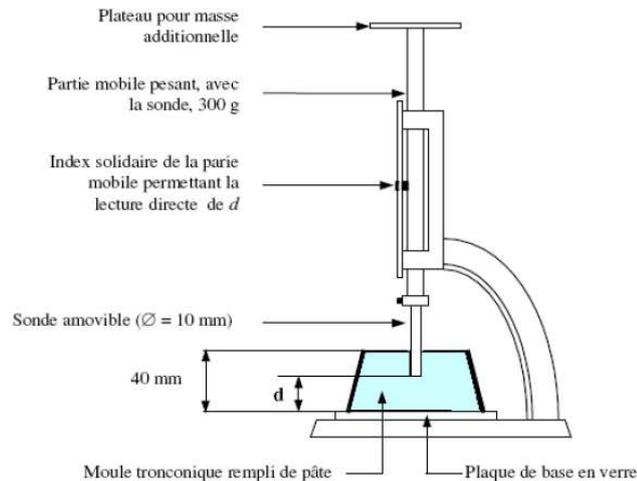


Figure III.5. Appareil de Vicat.

Le phénomène de prise du ciment est lié à de nombreux paramètres tels que :

- la nature du ciment
- la finesse du ciment : plus son broyage a été poussé, plus le temps de prise est court.
- la température ambiante : plus la température est élevée plus la prise est rapide.
- l'excès d'eau de gâchage qui a , entre autres inconvénients, une action retardatrice sur la prise.
- La présence de matière organique dans l'eau ou dans l'un des autres constituants du béton qui ralentit la prise

Suivant les types de ciment, le temps de début de prise doit être supérieur à 1 heure.

b) La chaleur d'hydratation

Le phénomène de prise du ciment s'accompagne d'une réaction exothermique dont l'importance dépend de différents paramètres, en particulier :

- la finesse de mouture : plus le ciment est broyé fin, plus la chaleur d'hydratation est élevée.
- La nature de ciment : les ciments CPA comportant presque exclusivement du clinker dégagent plus de chaleur que des ciments avec constituants secondaires
- La nature minéralogique du clinker : plus les teneurs en aluminat tricalcique (C_3A) et silicate tricalcique (C_3A et C_3S) sont élevées, plus la chaleur d'hydratation est forte
- La température extérieure.

c) Durcissement

On a l'habitude de considérer le durcissement comme la période qui suit la prise et pendant laquelle l'hydratation du ciment se poursuit. La résistance mécanique continue à croître très lentement ; mais la résistance à 28 jours est la valeur conventionnelle.

d) L'expansion

Les ciments doivent être stables (minimum d'expansion), car les risques d'expansion dans le temps peuvent provoquer des désordres importants dans les structures.

Elle se mesure suivant un procédé normalisé par la norme NF EN 196-3 et grâce aux aiguilles de Le Chatelier où on mesure l'écartement des aiguilles. L'expansion ne doit pas être supérieure à 10 mm sur pâte pure pour tous les ciments.

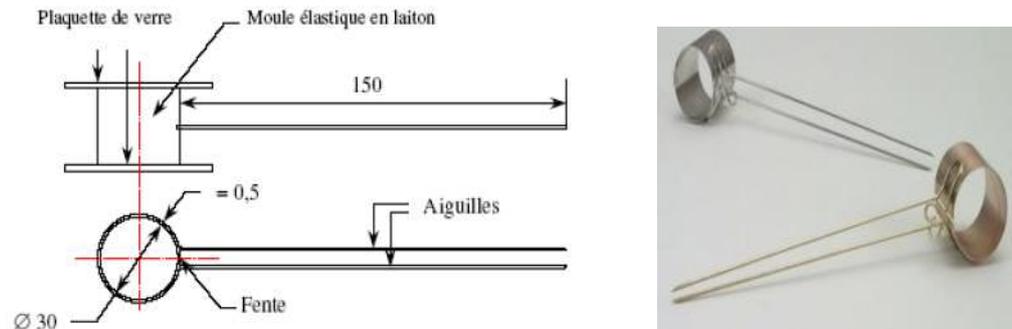


Figure III.6. Aiguilles de Le Chatelier.

e) Le retrait

La mesure du gonflement dans l'eau et du retrait dans l'air est effectuée sur prisme de 4x4x16cm sur «mortier normal». Le retrait est limité à 0,8 mm/m ou à 1 mm/m suivant le type de ciment.

L'importance du retrait hydraulique, en général, est en fonction de nombreux paramètres parmi lesquels :

- La nature du ciment ;
- Le dosage en eau, rapport E/C ;
- La propreté des sables ;
- La forme et la dimension des granulats.

f) Les résistances mécaniques

Mesurées sur éprouvettes de mortier normal, elles caractérisent de façon conventionnelle la résistance du ciment définie par sa valeur nominale. Cette valeur est la limite inférieure de résistance en compression à 28 jours.

10. Classification des ciments en fonction de leur résistance nominale

Quelle que soit l'appellation du ciment, la classe indique la résistance limite garantie obtenue à 28 jours et en compression.

Trois classes de résistance nominale sont couvertes : **32,5, 42,5 et 52,5**

- Pour chaque classe de résistance nominale, une sous-classe de résistance aux jeunes âges est définie (L, N et R).
- Pour tous les types de ciments, la résistance à la compression, déterminée selon EN196- 1 (résistance en compression sur éprouvette normée) doit satisfaire aux spécifications du tableau suivant :

Classe	Résistance à la compression (MPa) EN 196-1				Temps de début de prise (min)	Stabilité (expansion) (mm)
	Au jeune âge		A 28 jours			
	2 jours	7 jours	Mini.	Maxi.		
32,5 N	--	16.0	≥ 32.5	≤ 52.5	≥ 75	≤ 10
32,5 R	≥ 10.0	--				
42,5 N	≥ 10.1	--	≥ 42.5	≤ 62.5	≤ 60	
42,5 R	≥ 20.1	--				
52,5 N	≥ 20.1	--	≥ 52.5	--	≥ 45	
52,5 R	≥ 30.0	--				

Tableau III.2. Spécification et valeurs garanties en fonction de la classe.



CHAPITRE 4

LES MORTIERS



Chapitre 4 : LES MORTIERS

1. Introduction

Dans toute construction, il est indispensable de réunir entre eux les différents éléments (blocs de béton, briques, éléments en béton préfabriqué, etc.) au moyen d'un mortier de ciment ou d'autre liant qui a pour but de :

- solidariser les éléments entre eux ;
- assurer la stabilité de l'ouvrage ;
- combler les interstices entre les blocs de construction.

Le mortier est obtenu par le mélange d'un liant (chaux ou ciment), de sable, d'eau et éventuellement d'additions. Des compositions multiples de mortier peuvent être obtenues en jouant sur les différents paramètres : liant (type et dosage), adjuvants et ajouts, dosage en eau. En ce qui concerne le liant, tous les ciments et les chaux sont utilisables ; leur choix et le dosage sont fonction de l'ouvrage à réaliser et de son environnement.

2. Composition des mortiers

Par définition, les mortiers contiennent des liants, des granulats et de l'eau ; éventuellement des adjuvants.

- a) *Liants* : généralement, on peut utiliser : les ciments normalisés ; les ciments spéciaux (alumineux fondu, prompt, ..) ; les liants à maçonner ; les chaux...
- La chaux : qui est le composant traditionnel du mortier, possède une plasticité et un pouvoir de rétention d'eau excellent, mais sa résistance mécanique est faible et sa cure est lente. La cure des mortiers de chaux s'effectue lentement par carbonatation sous l'effet du gaz carbonique de l'air ; ce processus peut être fortement ralenti par temps froid et humide.
 - Le liants à maçonner : est un produit déposé contenant du ciment portland et un filler minéral inerte (calcaire) et des adjuvants tels que des agents hydrofuges et des entraîneurs d'air.

- b) *Les adjuvants* : Les adjuvants sont des produits chimiques que l'on utilise pour modifier les propriétés des bétons et des mortiers auxquels ils sont ajoutés en faible proportion (environ de 5% du poids de ciment).
- c) *Granulats* : Le sable est le granulats le plus employé fréquemment. Il est inerte et sert tout d'abord à accroître la compacité. Ses limites granulométriques sont entre 0,080 mm et 4 mm.
- d) Eau : remplit un double rôle : elle sert à hydrater le ciment et ce qui est plus important, elle contribue à son ouvrabilité. Les mortiers devraient contenir la quantité d'eau maximale compatible avec une ouvrabilité optimale. L'eau devrait être propre et ne pas contenir de produits nocifs tels que des acides, des alcalis ou des matières organiques. Lorsqu'elle est potable, on peut l'utiliser.

3. Les différents types de mortiers

En construction on utilise différents types de mortier :

3.1. Les mortiers de ciment

Les mortiers de ciments sont très résistants, prennent et durcissent rapidement. Le dosage du rapport entre le ciment et le sable est en général volumétrique de 1:3 et le rapport de l'eau sur ciment est environ 0,35. Les dosages courants sont de l'ordre de 300 à 400 kg de ciment pour 1m³ de sable.

3.2. Les mortiers de chaux

Les mortiers de chaux sont moins résistants par rapport aux mortiers de ciment (gras et onctueux). La durée du durcissement des mortiers de chaux est plus lente que pour les mortiers de ciments.

3.3. Les mortiers bâtards

Ce sont les mortiers, dont le liant est le mélange de ciment et de chaux. Généralement, on utilise la chaux et le ciment par parties égales, mais des fois on prend une quantité plus ou moins grande de l'un ou l'autre suivant l'usage et la qualité recherchée.

3.4. Mortiers fabriqués sur chantier

Ils sont préparés avec le ciment et le sable du chantier. Le ciment est un ciment courant CPA ou CPJ et parfois des ciments spéciaux comme le ciment alumineux fondu.

On emploie également des chaux hydrauliques et parfois des liants à maçonner. Le sable est le plus souvent roulé (nature silico-calcaires) parfois concassé et le gâchage s'effectue à la pelle ou à l'aide d'une petite bétonnière. Ces mortiers ne sont donc pas très réguliers et les sables peuvent être différents d'une livraison à l'autre, mais de toutes façons ils doivent être propre et de bonne granulométrie.

3.5. Mortier industriel

Ce sont des mortiers que l'on fabrique à partir de constituants secs, bien sélectionnés, conditionnés en sacs, contrôlés en usine et parfaitement réguliers. Pour utiliser ce type de mortiers, il suffit de mettre la quantité d'eau nécessaire et malaxer pour ensuite les mettre en œuvre.

Les mortiers peuvent contenir des liants et des sables variés ainsi que certains adjuvants et éventuellement des colorants.

Les fabricants de mortiers industriels proposent une gamme complète de produits répondant à tous les besoins

4. Les emplois des mortiers

4.1. Les joints de maçonnerie

La construction réalisée en éléments maçonnés (blocs de béton, pierres de taille, briques), nécessite leur assemblage avec un mortier qui doit présenter des caractéristiques mécaniques suffisantes pour assurer la transmission des charges et une compacité suffisante pour être étanche. On a généralement intérêt à utiliser des mortiers ne présentant pas un module d'élasticité trop élevé, de façon à pouvoir s'adapter aux variations dimensionnelles des éléments qu'il liaisonne sans fissurer.

Les mortiers de joints constituent donc un maillon important de la maçonnerie, qui doit être bien étudié et bien mis en œuvre pour assurer la fonction qui lui est dévolue. C'est notamment le cas de la maçonnerie apparente.



Figure IV.1. *Joints de maçonnerie.*

4.2. Les enduits

Ce domaine d'application, qui constitue l'un des plus vastes débouchés des mortiers.

Aujourd'hui se développent les enduits monocouches épais, ainsi que les enduits isolants considérés encore comme non traditionnels.



Figure IV.2. Application d'enduit.

4.3. Les chapes

Les chapes ont pour fonction d'assurer la mise à niveau du dallage et la régularité de sa surface. Les chapes peuvent constituer la finition : on y incorpore alors souvent des produits spécifiques. Elles peuvent aussi constituer le support d'un revêtement de sol. Les chapes doivent présenter une résistance suffisante pour assurer la transmission des charges au support.

Adhérente ou flottante, la chape peut également avoir une fonction thermique ou acoustique.



Figure IV.3. Application d'enduit pour chape.

4.4. Les scellements et les calages

La multiplicité des problèmes de scellement et de calage a conduit les producteurs de mortiers industriels à mettre au point des produits spécifiques adaptés aux travaux à réaliser : scellements d'éléments de couverture, scellements d'éléments de second œuvre, scellements de mobiliers urbains, scellements de regards de visite, assemblage d'éléments préfabriqués...



Figure IV.4. Calage d'un poteau en charpente métallique.

5. Les essais sur mortier frais :

Pour pouvoir évaluer les caractéristiques des mortiers on prend souvent comme référence le mortier 1/3 composé en poids de : une partie de ciment et de 3 parties de sable normalisé dont les grains s'échelonnent de 80 microns à 2 mm.

5.1. Consistance (Ouvrabilité)

La consistance ou l'ouvrabilité d'un mortier se mesure à l'aide de divers appareils. Le plus connu est :

La table à secousses : le mortier, après avoir été mis en place et démoulé d'un moule tronconique, reçoit 15 chocs en 15 secondes en soulevant la table à secousses et la laissant retomber librement d'une hauteur donnée. On mesure le diamètre de la galette ainsi obtenue.



Figure IV.5. Table à secousses manuelle.

L'étalement en % est donné par la formule :

$$E(\%) = \frac{D_r - D_i}{D_i} \times 100 \quad (\text{IV-1})$$

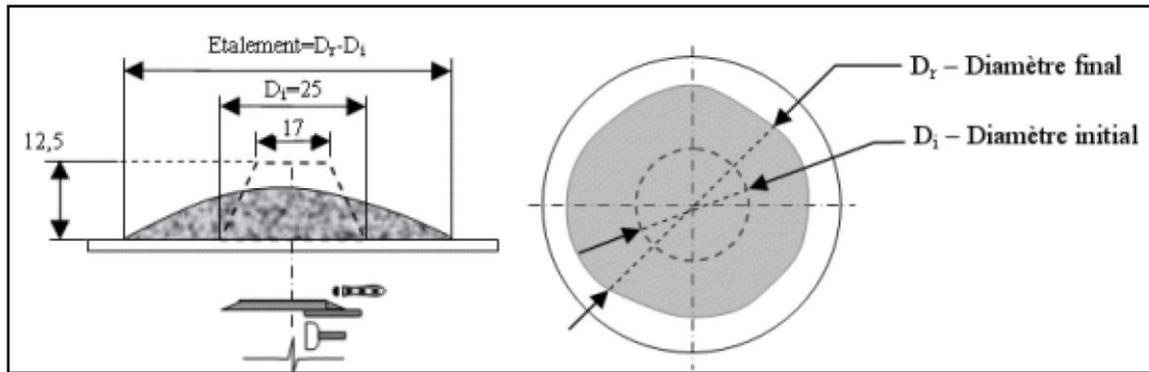


Figure IV.6. Table à secousses.

Avec

D_f : diamètre final

D_i : diamètre initial (le diamètre de la base du moule tronconique)

Le tableau suivant montre l'ouvrabilité du mortier en fonction des résultats d'étalement trouvés à l'aide de la table à chocs.

Ouvrabilité	Etalement à la table en (%)
Très ferme	10 - 30
Ferme	30 - 60
Normal	60 - 80
Mou (très plastique)	80 - 100
Très mou à liquide	>100

Tableau IV.1. Ouvrabilité du mortier.

5.2. Délais de prise :

Le temps de prise se mesure habituellement sur une pâte pure de ciment de consistance normale et conformément à la norme concernée (à l'aide de l'appareil de Vicat).

Il est possible d'obtenir le temps de prise d'un mortier avec le même appareillage mais en plaçant une surcharge de 700 gr sur le plateau supérieur. Le poids de l'aiguille pénétrant dans le mortier est de 1000 gr (300+700) gr. Le début de prise est l'instant où l'aiguille s'arrête à 2,5 mm du fond et la fin de prise est l'instant où l'aiguille s'arrête à 2,5 mm du niveau supérieur.

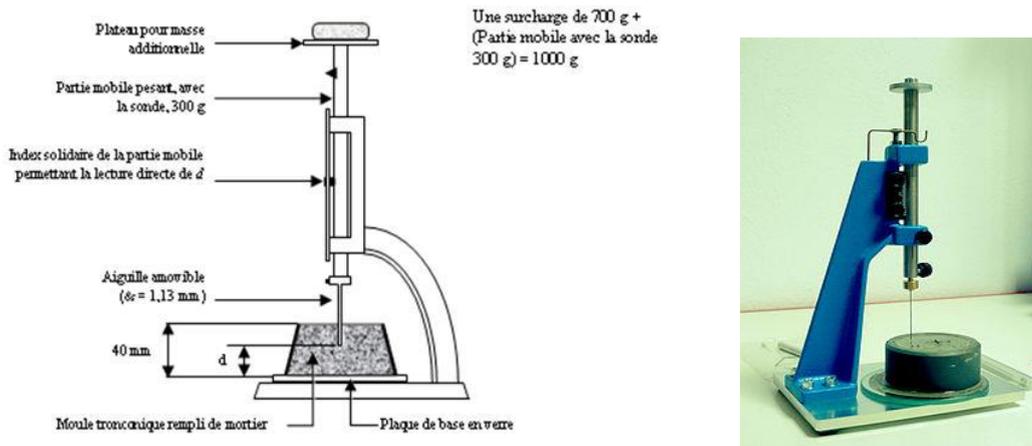


Figure IV.7. Appareil de Vicat muni de l'aiguille avec une surcharge.

6. Les essais sur mortier durci :

6.1. Confection et conservation des éprouvettes de mortier

Les essais sont souvent effectués sur les éprouvettes prismatiques de 4 x 4 x 16 cm conservés dans l'eau à 20 °C. Une chambre ou une armoire humide maintenue à une température de 20 °C ± 1 °C et à une humidité relative supérieure à 90 %.

Un malaxeur normalisé (figure 8.a). Des moules normalisés (figure 8.b) permettant de réaliser 3 éprouvettes prismatiques de section carré 4cm x 4cm et de longueur 16 cm (ces éprouvettes sont appelés "éprouvettes 4x4x16").

Un appareil à chocs permettant d'appliquer 60 chocs aux moules en les faisant chuter d'une hauteur de 15mm± 0,3mm à la fréquence d'une chute par seconde pendant 60 s.



Figure IV.8. Malaxeur normalisé (a) et moule normalisé (b) pour pate et mortier normal.

6.2. Retrait et gonflement

Les retraits se mesurent sur des prismes 4 x 4 x 16 cm, munis de plots à leurs extrémités et conservés, après démoulage, dans une enceinte à 20 °C et à 50 % d'humidité relative. On compare, à différents temps t , la variation de longueur de l'éprouvette 4x4x16cm, par rapport à sa longueur à un temps t_0 pris pour origine. Les plots sont vissés au moule au moment de la mise en place du mortier puis désolidarisés du moule avant le démoulage. Après durcissement, les éprouvettes 4x4x16 sont donc munies à leurs deux extrémités de plots. Un déformètre équipé d'un comparateur permettant de réaliser des mesures avec une exactitude inférieure ou égale à 0,005mm. Une tige de 160 mm de longueur doit permettre de régler le zéro du déformètre. Cette tige est en Invar de façon à ce que les variations de température qu'elle peut connaître au cours de la manipulation n'entraînent pas de modification appréciable de sa longueur.

Le gonflement des mortiers (qui se produisent lorsqu'ils sont conservés dans l'eau) se mesure sur les mêmes éprouvettes de 4 x 4 x 16 cm conservées dans l'eau à 20 °C.

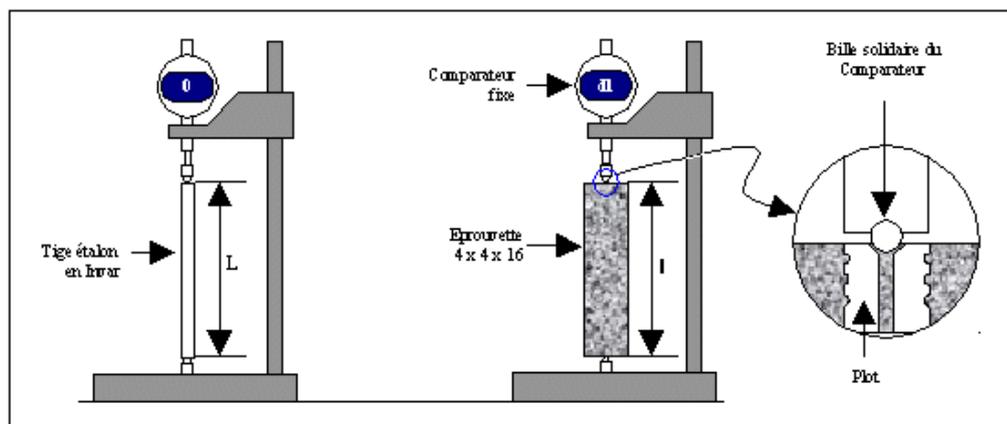


Figure IV.9. Essai de retrait.

6.3. Résistances mécaniques

Les résistances des mortiers (comme dans le cas des bétons) dépendent de très nombreux facteurs :

- Nature et dosage en ciment.
- Rapport C/E.
- Granulométrie et nature du sable.
- Énergie de malaxage et mise en œuvre.

6.3.1. Mesure de la résistance à la traction par flexion

La résistance à la traction par flexion des mortiers est évaluée par des essais de flexion 3 points effectués sur des éprouvettes prismatiques 4x4x16 cm³, avec une vitesse de chargement de 50 N/s.

$$R_f = \frac{1,5F_f l}{b^3} \quad (IV-2)$$

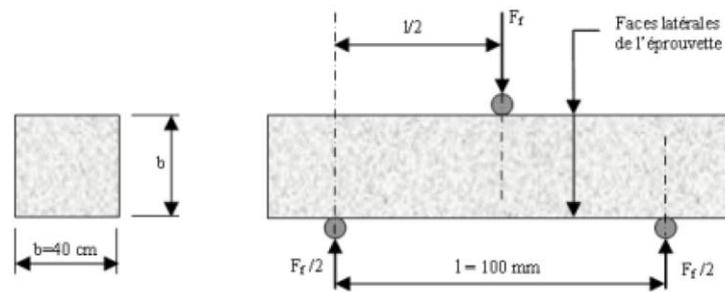


Figure IV.10. Essai de traction par flexion 3 points sur mortier.

6.3.2. La résistance à la compression

La résistance à la compression des mortiers est évaluée sur les six demi-prismes obtenus dans l'essai de flexion. Ces essais sont effectués selon la norme NF EN 196-1. La contrainte de compression est donnée par la formule suivante :

$$R_c = \frac{F_c}{b^2} \quad (IV-3)$$

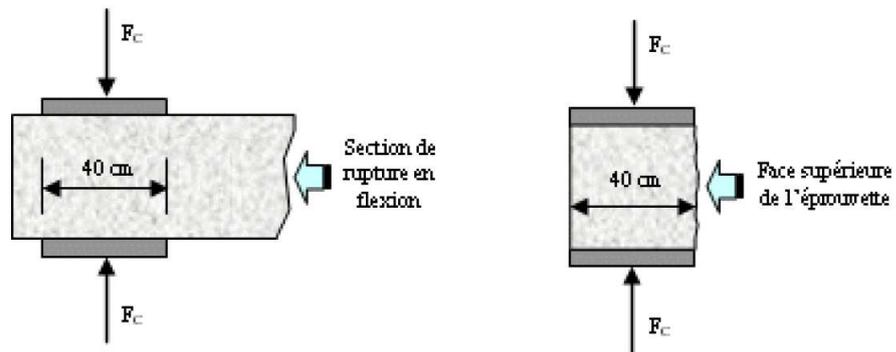
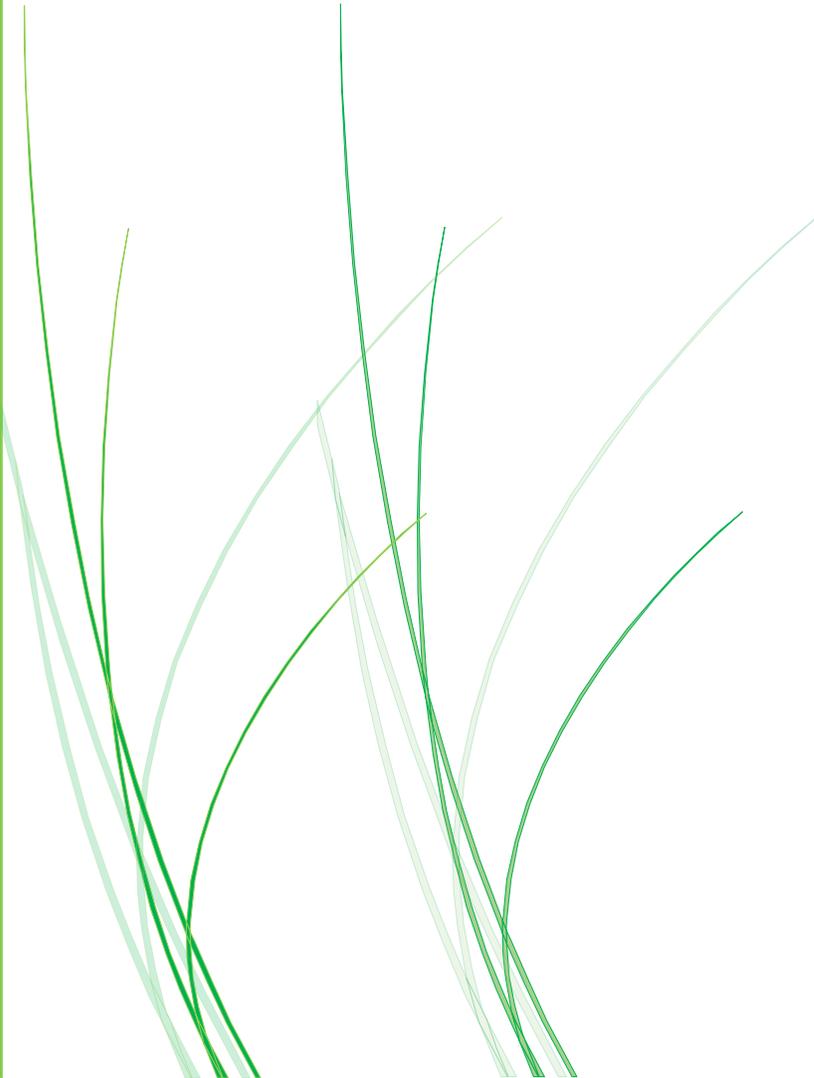


Figure IV.11. Essai de compression sur mortier.



LES REFERENCES



Références

- [1] DELISLE J.P., ALOU F., « Matériaux de construction 1 », Lausanne, octobre 1978.
- [2] JAMAL M., BOULAI A., « Rapport bibliographique sur la relation entre le génie civil et la géologie : Matériaux de Construction », Université Mohammed Ier, faculté des sciences – OUJDA -, 2014.
- [3] DREUX G., FESTA J., « Nouveau guide du béton et de ses constituants » Huitième Editions Eyrolles. 1998.
- [4] Guide pratique du béton, « Concevoir et mettre en œuvre des bétons durables ». Editeur : Holcim (Suisse) SA , 6ème Edition 2015.
- [5] BARON J. et SAUTREY R., « Le béton hydraulique », Paris, Presse de l'école nationale des ponts et chaussées, 560 p., (1995).
- [6] COLLECTION TECHNIQUE CIMBÉTON G10, Fiches techniques, Tome1 : « Les constituants des bétons et des mortiers», Édition septembre 2005.
- [7] NEVILLE A.M., «Propriétés des bétons». Paris, Editions Eyrolles, 824 p., 2000.