

**CENTRE UNIVERSITAIRE ABDELHAFID
BOUSSOUF MILA**

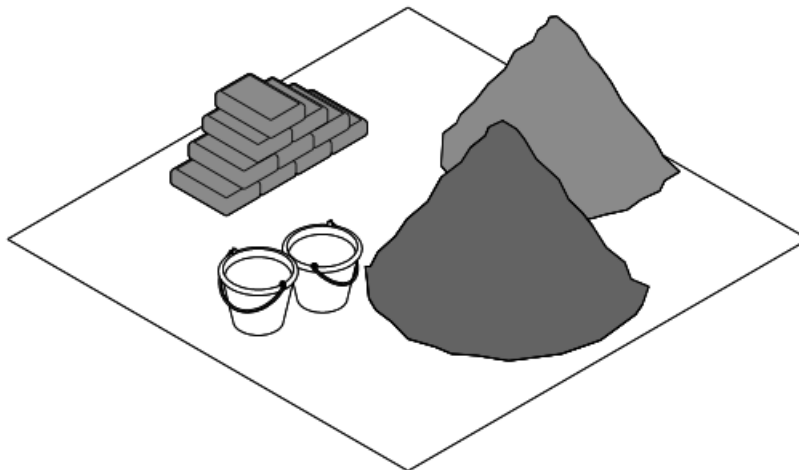
Institut des Sciences et de La Technologie

Département sciences et techniques



Support de cours de la matière:

Matériaux de construction



Niveau : 2^{ème} Licence en Génie Civil

Préparé par :

Dr. Guettiche Abdelheq

Année universitaire : 2017/2018

Email : a.guettiche@centre-univ-mila.dz

Sommaire

Chapitre I : Généralités :

AVANT-PROPOS	1
OBJECTIFS DU COURS	2
I. Introduction	4
II. Historique des matériaux de construction	4
II.1. Le Bois.....	4
II.2. Les pierres.....	5
II.3. Le ciment.....	5
II.4. L'acier.....	6
II.5. Le béton.....	8
III. Classification des matériaux de construction	10
III.1. Selon la nature de liaisons moléculaire.....	11
III.2. Selon domaines d'emploi.....	11
IV. Propriétés des matériaux de construction	12
IV.1. Propriétés physiques.....	12
IV.2. Propriétés Mécaniques.....	17
IV.3. Propriétés chimiques.....	20
IV.4. Propriétés physico-chimiques.....	21
IV.1. Propriétés thermiques.....	12

Chapitre II: Les granulats

I. Définition	25
II. Classification des granulats	25
II.1. Selon la grosseur.....	26

II.2. Selon la nature minéralogique.....	27
II.3. Selon les caractéristiques géométriques.....	27
II.4. Selon l'origine des granulats.....	27
III. Fabrication (exploitation des gisements).....	30
III.1. Extraction.....	31
III.2. Traitement.....	31
IV. Caractéristique des granulats.....	33
IV.1. Caractéristiques géométriques.....	34
IV.2. Caractéristiques physiques.....	40
IV.3. Caractéristiques mécanique.....	43
IV.4. Caractéristiques Chimique.....	45
V. Différents types des granulats.....	46

Chapitre III: Les liants

I. Définition.....	52
II. Classification.....	52
II.1. Les liants hydrauliques.....	52
II.2. Les liants aériens.....	52
III. La chaux.....	52
III.1. Chaux aérienne.....	52
III.2. Chaux hydraulique.....	53
IV. Le ciment portland.....	53
IV.1. Principe de fabrication ciment portland.....	54
IV.2. Les principales catégories de ciment.....	60
IV.3. Influence des phases cristallines sur les propriétés du ciment.....	63
IV.4. Constituants principaux et additions.....	63

Chapitre IV: Les mortiers

Définition.....	66
I. Composition.....	66
II.1. Le liant.....	67
II.2. Le sable.....	67
II.3. L'eau de gâchage	68
II.4. Les adjuvants.....	69
II.5. Les ajouts.....	69
III. Les différents types de mortier.....	70
III.1. Selon le type de liant utilisé.....	70
III.2. Selon le processus de fabrication.....	71
IV. Caractéristiques principales.....	72
IV.1. L'ouvrabilité.....	72
IV.2. La prise.....	73
IV.3. La résistance mécanique.....	74
IV.4. Retraits et gonflements.....	76
V. Qualité d'un bon mortier.....	77
VI. Emplois des mortiers.....	78
VI.1. Les joints de maçonnerie.....	78
VI.2. Les enduits.....	78
VI.3. Les chapes.....	79
VI.4. Les scellements et les calages.....	79
Références bibliographiques.....	80

Avant-propos

Ce document est un développement de certaines notes de cours du module Matériaux de construction est destiné, particulièrement, aux étudiants de la 2^{ème} année génie civil comme un support pédagogique au cours « Matériaux de construction».

Certes, que les matériaux de construction est un sujet très vaste. Seuls sont donc retenus les points importants, sans entrer dans trop de détails.

Pour une meilleure compréhension, un langage scientifique assez simple a été utilisé et de nombreuses applications ont été exposées afin d'aider l'étudiant à assimiler le cours et à dégager une idée claire sur les concepts abordés.

Nous souhaiterons que cet effort soit suivi par d'autres. Cela ferait augmenter le nombre de documents didactiques dans le domaine des matériaux de construction

Mr. Guettiche Abdelheq

Objectifs du cours :

Aborder les principaux matériaux de construction, à travers l'étude de leurs propriétés physico-chimiques et mécaniques tout en sensibilisant les futurs cadres aux aspects technologique, économique et réglementaire. A l'issue de ce cours, les étudiant-licence doivent être capables de :

- Comprendre la fonction des matériaux dans la construction.
- Caractériser les paramètres physico-mécaniques des matériaux de construction.
- Décrire le comportement mécanique des matériaux étudiés.
- Choisir dans des cas simples un matériau et une mise en œuvre adaptés à un ouvrage.
- Évaluer les risques pathologiques et proposer des solutions dans des cas simples.

Chapitre I :

Généralités

I. Introduction

II. Historique des matériaux de construction

II.1. Le Bois

II.2. Les pierres

II.3. Le ciment

II.4. L'acier

II.5. Le béton

III. Classification des matériaux de construction

III.1. Selon la nature de liaisons moléculaire

III.2. Selon domaines d'emploi

IV. Propriétés des matériaux de construction

IV.1. Propriétés physiques

IV.2. Propriétés Mécaniques

IV.3. Propriétés chimiques

IV.4. Propriétés physico-chimiques

IV.5. Propriétés thermiques

Chapitre I : Généralités

I. Introduction :

On appelle matériaux de construction toutes matières dures et durables qui entrent dans la construction d'un ouvrage. L'objectif de la science des matériaux de construction serait de permettre un choix optimal des M.D.C. utilisés dans la réalisation d'un projet de construction, en prenant en compte les conditions d'économie et de sécurité.

II. Historique des matériaux de construction :

II.1. Le Bois :

Le bois est le premier matériau utilisé par les hommes dans la construction depuis des temps immémoriaux (Vers 6000 à 7000 Av J.C)



✓ **Avantage :**

Légèreté, confort, bonne isolation thermique. (Conductivité thermique 15 fois plus faible que celle du béton et 400 fois plus faible que celle de l'acier).

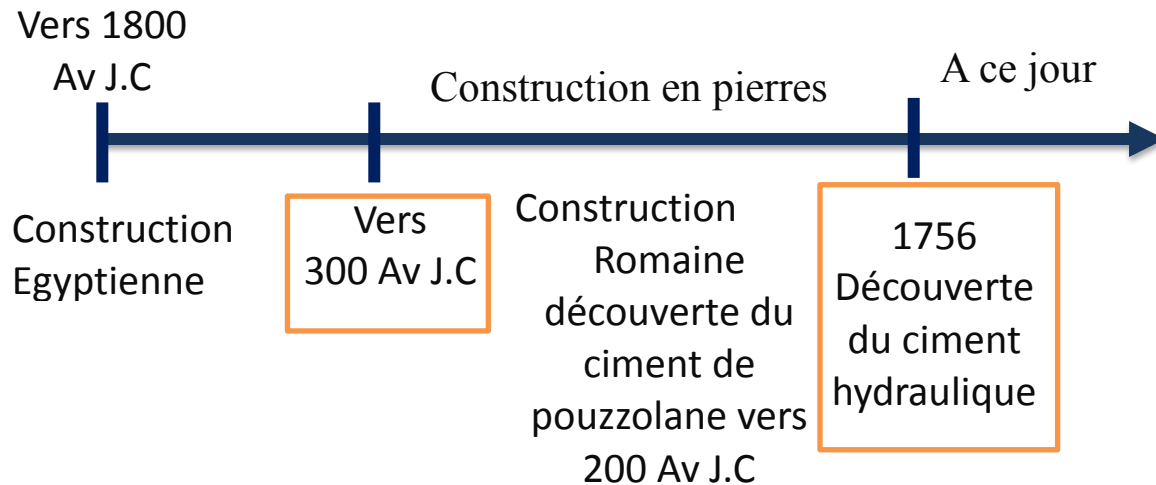
✓ **Inconvénients :**

Coût élevé, difficulté de réaliser des jonctions rigides, résistance mécanique relativement faible, capacité d'accumulation de chaleur faible, vulnérabilité au feu.

Bon pour la construction des maisons de faibles hauteurs (maisons individuelles en particulier).

II.2. Les pierres :

Les matériaux de construction trouvent leur origine dans le sol, en premier lieu les pierres qui sont depuis les temps les plus anciens sont des éléments de construction



✓ Avantage :

Longévité, bonne résistance à la compression

✓ Inconvénient :

Poids élevé (tassement probable), main d'œuvre demandée très qualifiée durée de réalisation longue, hauteur limitée, mauvaise résistance à la traction.

II.3. Le ciment :

Dans la préhistoire et au début de l'Antiquité, les maçonneries étaient soit liées à l'argile, soit réalisées sans liant (la civilisation grecque, et la civilisation inca). Les premiers à fabriquer des liants hydrauliques susceptibles de durcir sous l'eau sont les Romains vers 200 Av J.C. Pour cela ils mélangeaient de la chaux et des déchets de fabrication des tuiles et des briques ou des cendres volcaniques il fallait mélanger à de la chaux des

déchets de fabrication des tuiles et des briques ou des cendres volcaniques (provenant notamment de Pozzuoli, dans la baie de Naples). C'est de là qu'est venu le nom « pouzzolanique », qui se dit d'un matériau capable, en présence d'eau, de fixer la chaux.

Le ciment ne prit son acception contemporaine qu'au 19^{ème} siècle, lorsque Louis Vicat identifia le phénomène d'hydraulicité des chaux en 1817.

Il donne des indications précises sur les proportions de calcaire et de silice pour constituer le mélange. Après les travaux de Joseph Aspdin et William Aspdin en Angleterre qui fabriquent et brevettent le ciment portland entre 1824 et 1838, l'industrie du ciment débuta vers 1840.

II. 4. L'acier :

Le fer a commencé à faire son apparition comme élément de construction au 18^{ème} siècle, alors que les matériaux usuels à cette époque étaient le bois et la pierre.

On considère souvent le **physicien Français Réaumur** comme le fondateur de la sidérurgie scientifique moderne. Il réalise de très nombreuses expériences afin d'améliorer la fabrication de l'acier et publie le résultat de ses observations en 1712.

L'utilisation du fer, de la fonte et de l'acier dans des ossatures porteuses se fait en trois étapes :

- L'ère dite de la fonte (1780-1850), qui débute avec la généralisation du haut fourneau au coke. (Ex la Halle au blé à Paris)

- L'ère du fer forgé (1850-1900) : qui remplace progressivement la fonte grâce à la mise au point du puddlage la tour Eiffel 1887-1889
- L'ère de l'acier (de 1880 à nos jours) : qui succède au fer avec la mise au point du convertisseur.



1889 : La tour Eiffel 320 m
assemble à rivet



1931: L'Empire State
Building 381m (102
étages)



1973 : Le World Trade
Center 110 étages 415m-
417m: s'effondre en 2011



1988: Le pont d'Akashi au Japon Sa portée centrale est la plus longue du monde, avec 1 991 m. La longueur totale du pont est de 3 911 m.

Figure. I.1

Ce matériau est utilisé seul dans la construction métallique (hangars, bâtiments, ponts, Réservoirs, Offshores ...etc.), ou pour pallier l'insuffisance de la résistance en traction du béton.

✓ **Avantage :**

- industrialisation totale : Possibilité de préfabriquer les bâtiments en atelier avec une grande précision et une grande rapidité
- Transformation : On peut modifier, adapter, surélever, renforcer un Bâtiment en acier par simple montage de certains de ces éléments.
- Possibilité architecturale importants : tous types de forme à l'infini, grâce à la masse volumique de l'acier ($\rho_a = 7850\text{kg/m}^3$ avec $\rho_b = 2500\text{kg/m}^3$). on arrive à avoir les sections en métallique 5 fois plus petite à une section du béton.
- Résistance en traction égale à la résistance en compression (l'idéale pour la flexion).

✓ **Inconvénient :**

- Légèreté : plus la construction est légère plus une nécessite des fondations importantes pour l'enclaver contre un soulèvement du vent.
- Susceptibilité aux phénomènes d'instabilité élastique : longues pièces, avec de petites épaisseurs et des petites sections (Flambement, déversement, voilement).
- Mauvaise tenue au feu.
- coût de maintenance élevé.

II.5. Le béton : Le béton est un matériau composite aggloméré constitué de granulats durs de diverses dimensions collés entre eux par un liant. De manière générale, les

principaux ingrédients employés sont le sable, le gravier, le ciment, le tout gâché avec de l'eau.

Comme les roches, le béton résiste bien à la compression, mais il a une faible résistance à la traction. Son utilisation comme matériaux de construction remonte aux Romains.

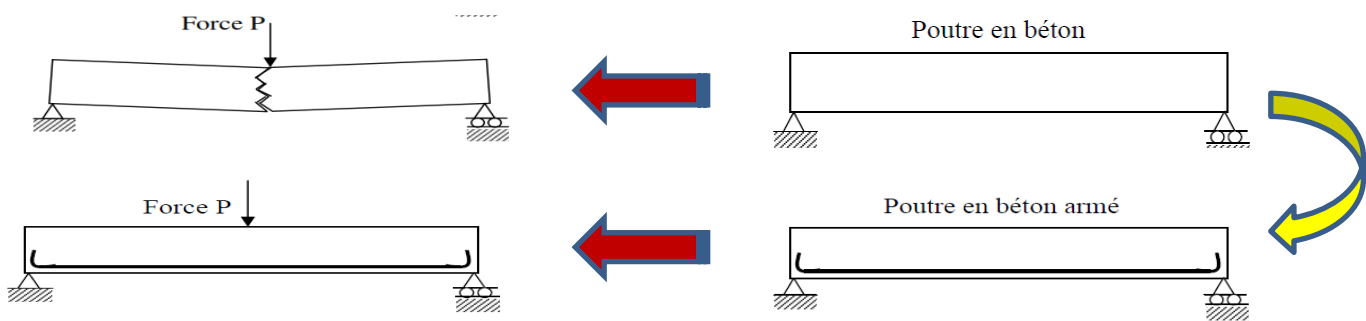


Figure. I.2

Le béton ne s'est véritablement développé qu'avec l'invention du béton armé par Joseph Monier (brevets en 1870). Des armatures en aciers pallient à son insuffisante résistance à la traction. En 1929, Eugène FREYSSINET (1879-1962) va révolutionner le monde de la construction en inventant le « béton précontraint ».

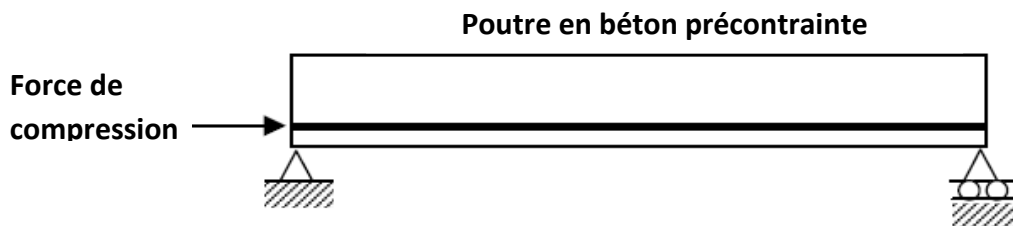


Figure. I.3

Le principe de ce dernier se base sur des armatures tendues mis en place avant coulage du béton puis relâchée après durcissement du béton. La fin des années 1980 voit l'arrivée des « Bétons Hautes Performances (BHP) ». Il est un béton caractérisé par une très forte résistance à la compression, puisque celle-ci est supérieure à 50 MPA à 28 jours, et des

propriétés exceptionnelles à l'état frais (notamment en termes de viscosité), à court ou à long terme.

Lors de la dernière décennie de nombreuses innovations ont révolutionné les constructions en béton, parmi lesquelles les « Bétons Autoplaçants (BAP) » et les « Bétons Fibrés à Ultra Hautes Performances (BFUHP) ».

Ce dernier combine les avantages des bétons très hautes performances et les bétons renforcés de fibres. En comparaison aux bétons normaux, ils contiennent plus de ciment, un ratio eau/ciment plus bas, des granulats à large distribution granulométrique et des fibres. sa résistance à la compression à 28 jours peut atteindre les 100Mpa.

✓ **Avantage :**

La construction en béton Permet la réalisation d'éléments de longues portées et de grandes structures monolithiques du fait que le béton se met en place à l'état frais. et avec un faible coût de maintenance.

✓ **Inconvénients :**

Construction lourde, possibilité de tassement, vulnérable aux forces d'inertie (forces sismique par exemple).

III. Classification des matériaux de construction :

En sciences des matériaux, il est possible de classer les matériaux de base en deux catégories :

III.1. Selon la nature de liaisons moléculaire :

a. Les métaux : Comme l'aluminium, l'acier, les métaux purs ou alliages .

b. les polymères : on trouve des polymères d'origine naturelle (cuir, laine, bois et fibres végétales) et des polymères d'origine artificielle (polystyrène, PVC, Résines, mousses, Caoutchouc, silicone...etc.)

C. Les céramiques : béton, roches, diamant, Verres, briques,...etc.

Mais dans la construction, il est devenu courant de distinguer les matériaux selon ces domaines d'emploi : les matériaux de construction, les matériaux de protection et les Matériaux de confort.

III.2. Selon les domaines d'emploi :

Dans la construction, il est devenu courant de distinguer les matériaux selon des domaines d'emploi.

a. Les matériaux de construction (de résistance mécanique): sont les matériaux qui ont la propriété de résister contre des forces importantes.

Exemples : pierre, bois, acier, sable, gravier, ciment,...etc.

b. Les matériaux de protection : sont les matériaux qui ont la propriété d'enrober et protéger les matériaux de construction principaux.

Exemples : peinture, bitume, produits d'étanchéité...etc.

C. Matériaux de confort : matériaux qui n'ont pas d'effets importants sur la résistance mécanique mais sont nécessaires pour l'exploitation des constructions.

Exemples : verre, plâtre, enduits, briques creuses, laine de verre ...etc.

IV. Propriétés des matériaux de construction :

Dans ce paragraphe on va présenter quelques propriétés comme les propriétés physiques et les propriétés mécaniques. Les principales propriétés des matériaux de construction peuvent être classées comme suit :

- **Propriétés physiques :** la dimension ; la masse volumique, la porosité ; l'humidité...etc.
- **Propriétés Mécaniques :** la Résistance (traction compression, flexion, torsion) ; le module d'élasticité.
- **Propriétés Chimiques :** l'Alcalinité ; l'acide ; les basiques.
- **Propriétés physico-chimiques :** (l'absorption, la perméabilité, le retrait et le gonflement etc..).
- **Propriétés thermiques :** (la dilatation, la résistance au feu, etc...).

IV.1. Propriétés physiques :

IV.1.1. La dimension : grandeur physique qui correspond à l'espace (distance, surface, volume ou angle).

IV.1.2. La masse volumique : C'est la masse d'un corps par unité de volume noté ρ et exprimée en gr/cm^3 , kg/m^3 , T/m^3

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

Où : **M** : masse d'un échantillon du matériau.

V : volume du même échantillon

a. La masse volumique apparente : C'est la masse d'un corps par unité de volume apparent en état naturel, après passage à l'étuve à $105 \pm 5^\circ\text{C}$, notée ρ_{app} .

Les matériaux pulvérulents (sables, graviers, ciment) se caractérisent par leur masse volumique apparente.

$$\rho_{app} = \frac{M_s}{V_{app}}$$

Où : M_s : masse d'un corps à l'état sec.

V_{app} : volume apparente = $V_v + V_s$, V_v : volume des vides et V_s : Volume d'un corps à l'état sec

Matériaux	Masse volumique (kg/m ³)	Matériaux	Masse volumique (kg/m ³)
Acier	7800 à 7850	Granit	2600 à 2800
fonte	6800 à 7400	Marbre	2650-2750
aluminium	2700	eau à 4 °C	1000
Sable	1450 à 1650	Béton lourd	1880 à 2500
Brique d'argile	1600 à 1800	Béton léger	580 à 1800

Tableau.I.1

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), après passage à l'étuve à 105°C :

$$\rho_{abs} = \frac{M_s}{V_{abs}} = \frac{M_s}{V_s}$$

Où : M_s : masse sèche

V_{abs} : volume absolu

Si les matériaux étudiés sont poreux, on doit les concasser et les broyer jusqu'à ce que la dimension des grains de matériaux devienne inférieure à 0,2 mm (éliminer les pores et

les vides existants). Ensuite, on verse l'échantillon dans un récipient, qui contient de l'eau pour pouvoir déterminer la masse volumique absolue.

Exemple : γ_{ab} absolue des granulats usuels : 2.6 à 2.7(en moyenne 2.68).

Remarque : Si les grains ne sont pas poreux, la masse spécifique absolue et apparente sont identiques.

A la place de la masse spécifique et de la masse volumique, on utilise aussi les anciennes dénominations de poids spécifique et de poids volumique ainsi que les notions de densité apparente qui sont des nombres sans dimension

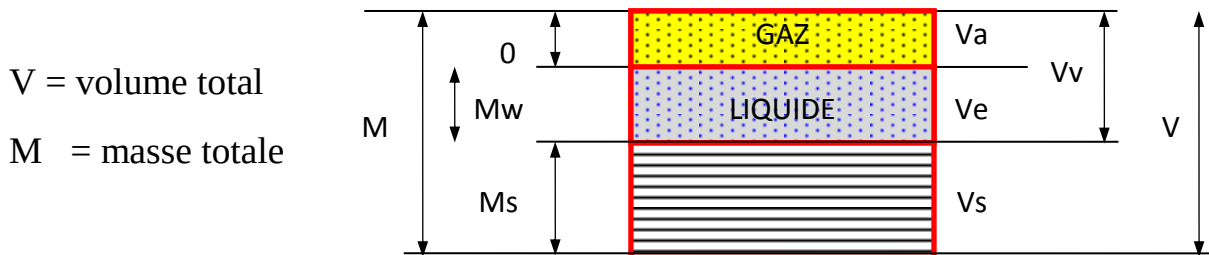


Figure. I.4

IV.1.3. La densité : C'est le rapport de la masse volumique du matériau à la masse volumique de l'eau pure à 4 °C.

$$d = \frac{\rho(\text{matériaux})}{\rho(\text{eau})}$$

La densité est une grandeur sans dimension et sa valeur s'exprime sans unité de mesure.

Matériaux	Densité	Matériaux	Densité
Acier	7.8 à 7.85	Pierre de taille	2.8 à 2.9
Ciment	3	Aluminium	2.5
Fer	7.87	Cuivre	8.96
Béton	1.8 à 2.5	Or	19.3

Tableau.I.2. Quelques valeurs de la densité

IV.1.4. Le poids volumique : Le poids spécifique ou poids volumique est le poids par unité de volume d'un matériau, déterminé par la relation suivante :

$$\gamma = \rho g$$

Où : ρ : la densité du matériau en kg/m^3

g : l'accélération de la chute libre en m/s^2

Le poids spécifique est une grandeur variable dépendant de la valeur de « g » où la mesure est faite, et ne peut donc servir pour caractériser la matière.

IV.1.5. La porosité et la compacité :

a. La porosité : C'est une grandeur physique entre 0 et 1 ou en pourcentage entre 0 et 100%. Elle est le rapport du volume vide au volume total. On peut aussi définir la porosité comme le volume de vide par unité de volume apparent.

$$P = \frac{\text{Volume de vide}}{\text{volume total}} \times 100 \quad \Rightarrow \quad \left[P = \frac{V_v}{V_t} \right] \times 100$$

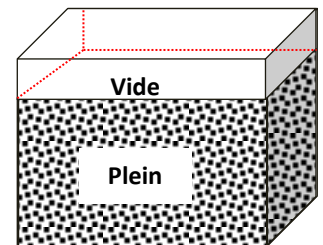


Figure. I.4 Volume quelconque

b. La compacité : La compacité est le rapport du volume des pleins (des grains) au volume total. Ou volume des pleins par unité de volume apparent.

$$C = \frac{\text{Volume des grains}}{\text{volume total}} \times 100 \quad \Rightarrow \quad \left[C = \frac{V_s}{V_t} \right] \times 100$$

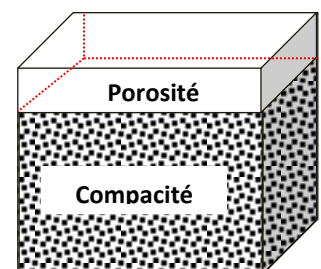


Figure. I.5

La porosité et la compacité sont liées par relation :

$$P + C = 1$$

La porosité et la compacité sont souvent exprimées en %. La somme des deux est alors égale à 100%. En effet :

$$P+C = \frac{\text{Volume plein}}{\text{Volume total}} + \frac{\text{Volume de vide}}{\text{Volume total}} = \frac{\text{Volume total}}{\text{Volume total}} = 100\%$$

Les pores sont des vides dans le matériau remplis d'air ou d'eau. Les pores peuvent être ouverts ou fermés et de petite ou grandes dimension.

Si l'on connaît la masse volumique apparente (ρ_{app}) et la masse volumique absolue (ρ_{abs}) d'un matériau, il est aisé de calculer sa compacité et porosité.

$$C = \frac{\text{Volume des grains}}{\text{volume total}} = \frac{V_{abs}}{V_{app}} = \frac{V_{abs}}{V_{app}} \times \frac{M_s}{M_s} = \frac{M_{s/V_{app}}}{M_{s/V_{abs}}}$$

D'où : $C(\%) = \frac{\rho_{app}}{\rho_{abs}} \times 100$ et $P(\%) = (1 - \frac{\rho_{app}}{\rho_{abs}}) \times 100$

IV.1.6. L'humidité (la teneur en eau): est une des propriétés importante des matériaux de construction. Cette propriété intervient dans un large éventail de disciplines scientifiques et techniques. 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 :

$$w(\%) = \frac{Mh - Ms}{Ms}$$

Où : **Ms**: la masse sèche d'échantillon (après passage à l'étuve)

Mh : la masse humide d'échantillon.

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.

Le terme humidité utilisé dans le langage de la construction correspond à une présence anormale d'eau dans un bâtiment. Celle-ci peut être sous forme de liquide, de vapeur d'eau ou de remontée capillaire. Elle est la source principale des dégradations dans les bâtiments.

IV.2. Propriétés Mécaniques : Les propriétés mécaniques permettent de caractériser le comportement du matériau (ou de la construction) sous l'effet de ces sollicitations (efforts internes). Cette propriété des matériaux est l'objet d'une discipline scientifique, appelée le Résistance Des Matériaux.

IV.2.1. La Contrainte (σ ou τ): un ensemble d'efforts intérieurs nécessaires pour équilibrer les forces extérieures. Dans la réalité, la contrainte s'exerce sur toute la surface de contact. L'intensité de la contrainte est donnée en Kgf/m^2 ou bars ou en Mpa.

IV.2.2. La déformation « ϵ » : Lorsqu'un corps est soumis à des forces extérieures, il y a un changement de sa forme ou de ses dimensions. Ce changement s'appelle déformation. Toute contrainte engendre une déformation. Selon la caractérisation de la déformation, on a 3 types :

a. La déformation élastique : La déformation élastique est une déformation réversible d'un matériau :

Le matériau retourne à son état initial lorsque l'on supprime les sollicitations. L'élasticité est la propriété de rétablir les dimensions initiales après l'enlèvement de la charge. Cette propriété peut être caractérisée par un coefficient de proportionnalité, reliant la déformation à la contrainte appliquée :

$$\sigma = E \times \epsilon$$

E : Module de Young (équivalent de K, la raideur du ressort) en N/mm^2

Un matériau dont le module de Young est très élevé est dit rigide. L'acier, l'iridium, le diamant, sont des matériaux très rigides, l'aluminium et le plomb le sont moins, les matières plastiques et organiques sont généralement peu rigides.

Il ne faut pas confondre rigidité et raideur. La rigidité caractérise les matériaux, la raideur concerne les produits et les constructions. Une pièce mécanique massive en matière plastique peut être beaucoup plus raide qu'un ressort en acier.

b. La déformation plastique :

Propriété qu'a un corps de conserver partiellement les déformations produites par une charge lorsque celle-ci est enlevée. La déformation plastique se produit quand la contrainte dépasse la limite d'élasticité.

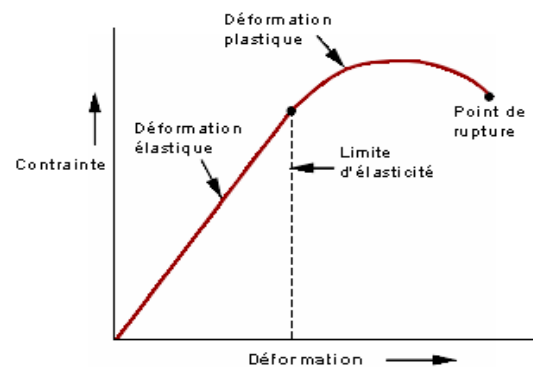


Figure. I.6

c. Déformation visqueuse : La déformation est dite visqueuse, si après décharge le corps ne reprend pas instantanément les mêmes formes qu'il avait avant l'essai, mais il se produit lentement.

En général la résistance des matériaux est sa capacité contre les actions des forces externes étant définie en contrainte maximale quand l'échantillon est détruit.

IV.2.3. La Résistance : La résistance des matériaux de construction se caractérise par une valeur maximale. C'est la contrainte correspondant à la charge qui provoque la rupture de l'échantillon.

a. Résistance à la compression : C'est la contrainte de rupture du matériau sous l'effet d'une force de compression. Pour le béton par exemple, Elle est mesurée par écrasement d'une éprouvette cubique ou cylindrique (normalisée).

Les dimensions des éprouvettes sont choisies en fonction du degré d'homogénéité du matériau ; pour les matériaux homogènes on utilise des éprouvettes de petites dimensions, pour les matériaux moins homogènes on utilise des éprouvettes plus grandes.

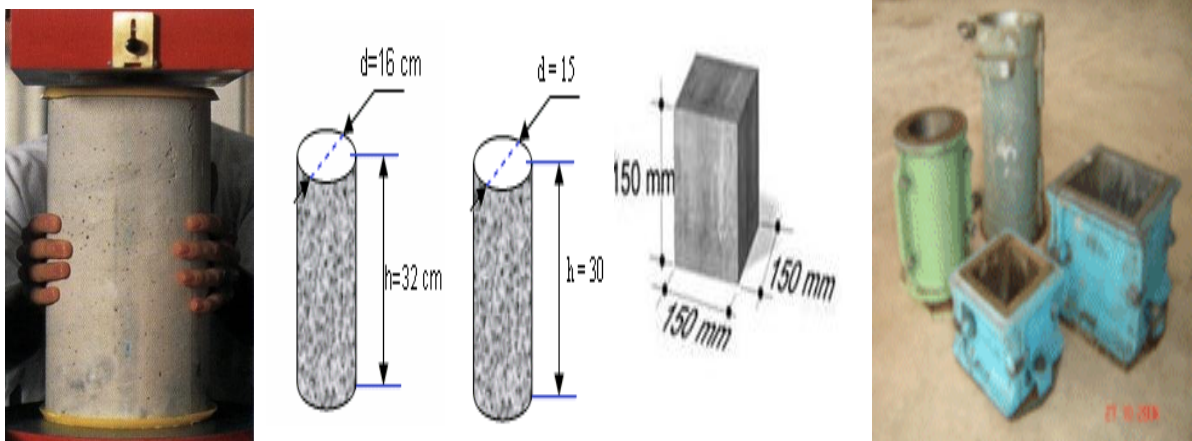


Figure. I.7. Les éprouvettes d'écrasement

Pour les essais sur le béton, le cylindre le plus couramment employé est le cylindre de 16 (d = 15,96 cm). La résistance sur cylindre d'élancement 2 (par exemple diamètre de 16 cm, hauteur de 32 cm) est plus faible de l'ordre de 20% que la résistance sur cubes de 20 cm.

$$f_{c \text{ cube } 15} = 1,17 \text{ à } 1,23 f_{c \text{ cylindre } 16}$$

b. Résistance à la Traction : Est la Valeur maximale de la contrainte de traction supportable par un élément avant endommagement (rupture ou endommagement partiel). Elle est Mesurée pour les métaux et les bois essentiellement. Pour l'acier on utilise des éprouvettes sous forme de tiges rondes ou de bandes.

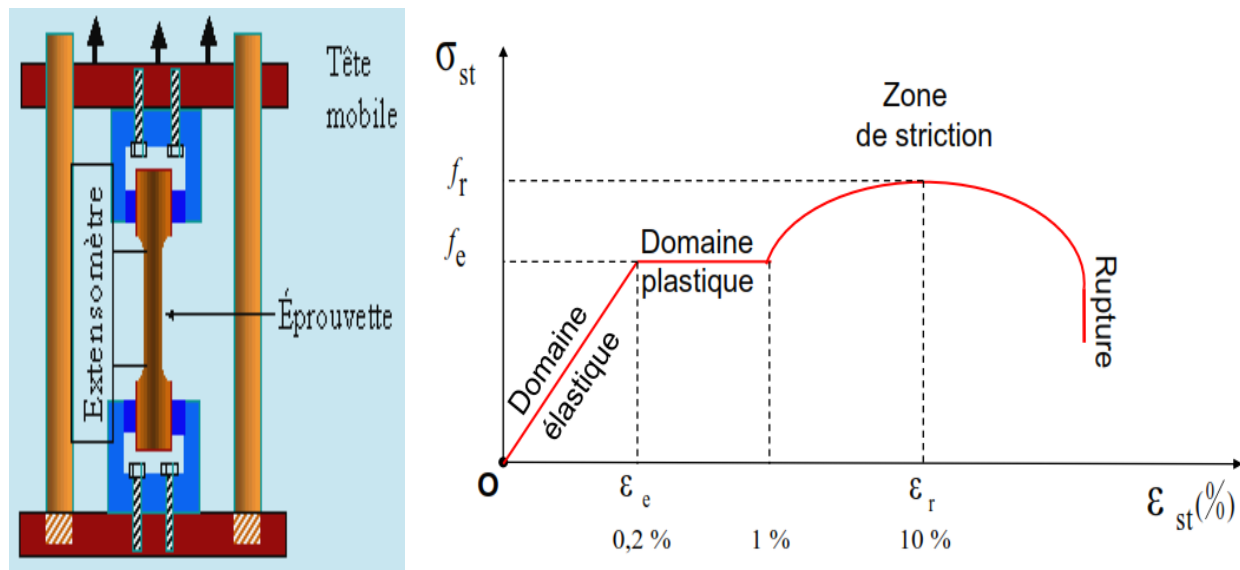


Figure. I.8.essais de traction pour les aciers

Prenant comme exemple une courbe ressortie d'un essai de traction sur une éprouvette d'acier. Pour cette courbe, trois phases de déformation peuvent être distinguées : la Phase de proportionnalité (élasticité), la Phase de plasticité et la Phase de rupture.

IV.3. Propriétés chimiques :

Stabilités en présence de certains produits et matières chimiques ; acides, bases, solutions salines, eau,...etc.

IV.3.1. Acidité : Un acide est un composé chimique, soit minéral, soit organique, accepteur au sens large de doublets électroniques, et généralement défini par des

réactions-types dans différents solvants, en particulier en libérant l'ion hydronium dans le solvant eau

La pâte de ciment fortement alcaline (valeur pH env. 12.5) offre une excellente résistance aux bases. Seules des bases très fortes (hydroxyde de sodium ou potasse caustique, > 20 %) attaquent l'alumine de la pâte de ciment et les granulats

IV.3.2. Basicité (Alcalinité) : Une base est un produit chimique qui, à l'inverse d'un acide, est capable de capturer un ou plusieurs protons ou, réciproquement, de fournir des électrons. Un milieu riche en bases est dit basique ou alcalin.

IV.4. Propriétés physico-chimiques :

IV.4.1. La perméabilité : La perméabilité d'un milieu poreux mesure son aptitude à se laisser traverser par un fluide sous l'effet d'un gradient de pression ou d'un champ de gravité. Elle est caractérisée par la quantité d'eau qui passe pendant une heure à pression constante à travers 1 m² de surface du matériau essayé.

IV.4.2. Le fluage : Le fluage Est le phénomène physique qui provoque la déformation irréversible différée qui augmente avec le temps sous l'effet d'une contrainte constante.

Le fluage peut se manifeste de 2 façons :

- Le fluage proprement dit.
- La relaxation.

Le fluage ainsi que la relaxation de contrainte sont deux méthodes en quasi statique de caractérisation des matériaux visqueux (cas du béton).

IV.4.3. Le retrait : Diminution de volume d'un élément due à des phénomènes chimiques et physiques. Pour le béton, le retrait est une contraction dimensionnelle dû à une perte en eau.

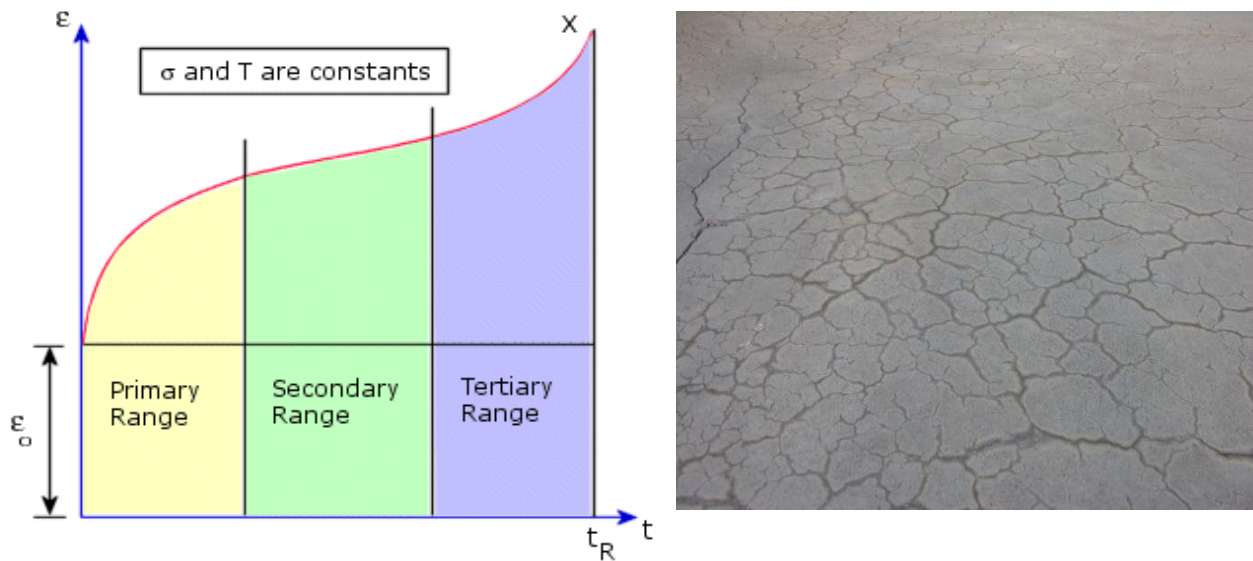


Figure. I.9. phénomène de retrait

IV.4.4. Le gonflement : Il se traduit par une augmentation du volume du sol ou un accroissement des pressions régnant dans le milieu selon que le massif peut se déformer ou non.

IV.5. Propriétés thermiques :

IV.5.1. Résistance au feu : Est le pouvoir d'un matériau de résister à l'action des hautes températures sans perdre sa capacité portante (sans diminution sensible de résistance et sans déformations importantes).

Cette propriété est d'une grande importance en cas d'incendie.

IV.5.2. La conductivité thermique : La conductivité thermique, λ [W/m.K] est la capacité d'un matériau de laisser passer la chaleur à travers son épaisseur. On trouve dans le tableau suivant la conductivité thermique de certains matériaux

Matériaux	λ (W/m.K)	Remarque
Cuivre	400	excellent conducteur thermique
Acier Doux	40	bon conducteur thermique
Verre	1.35	
Béton armé	2.3	
Plâtre	0.53	
Brique	0.3	
Laine de verre	0.03-0.05	excellent isolant
Bois	0.15-0.4	bon isolant
Air	0.026	

Tableau.I.3. Coefficient de conductibilité thermique pour certains matériaux

IV.5.3. La dilatation thermique : La dilatation thermique est l'expansion à pression constante du volume d'un corps occasionné par son réchauffement, généralement imperceptible. La plupart des matériaux se dilatent lorsque leur température s'élève.

On peut étudier la dilatation d'un matériau isotrope en fonction de la variation d'une dimension linéaire et donc de volume en fonction de la variation de température.

Chapitre II :

Les granulats

I. Définition

II. Classification des granulats

II.1. Selon la grosseur

II.2. Selon la nature minéralogique

II.3. Selon les caractéristiques géométriques

II.4. Selon l'origine des granulats.

III. Fabrication (exploitation des gisements)

III.1. Extraction

III.2. Traitement

IV. Caractéristique des granulats

IV.1. Caractéristiques géométriques

IV.2. Caractéristiques physiques

IV.3. Caractéristiques mécanique

IV.4. Caractéristiques Chimique

V. Différents types des granulats

CHAPITRE II : Les granulats

I. Définition des granulats :

On appelle « granulats » les matériaux inertes, sables, graviers ou cailloux, qui entrent dans la composition des bétons. Selon la norme Algérienne NA EN 12620 : la granulométrie est la distribution des dimensions des grains contenus dans un granulat dont les dimensions sont comprises entre 0 et 125 mm dont l'origine peut être naturelle, artificielle ou provenant de recyclage.



Figure. II.1. Différents types de granulats

Exemple : sables ; gravillons, ballast, granulats artificiels...etc.

Les granulats sont utilisés pour la réalisation des :

- Des mortiers et des bétons.
- Des couches de fondation, des couches de base et de roulement des chaussées, et des assises et des ballasts de voies ferrées.
- Des drains.

II. Classification des granulats :

II.1.Selon la grosseur :

Un granulat est caractérisé du point de vue granulaire par sa classe d/D exprimées en mm selon la norme NA EN 12620. Le premier « d » désigne le diamètre minimum des grains et le deuxième « D » le diamètre maximum.

Exemples : granulats rencontrés en pratique : sable 0/3, gravier 3/8, gravier 8/15, gravier 15/25.

- Lorsque d est inférieur à 0.5 mm, le granulat est désigné 0/D.
- Si un seul chiffre est donné, c'est celui du diamètre maximum « D » exprimé en mm.

Il existe cinq classes granulaires principales :

- Les fines : 0/D avec $D \leq 0,08$ mm,
- Les sables : 0/D avec $D \leq 6,3$ mm,
- Les gravillons : d/D avec $d \geq 2$ mm et $D \leq 31,5$ mm,
- Les graves : d/D avec $d \geq 6.3$ mm et $D \leq 80$ mm,
- Les cailloux : d/D avec $d \geq 20$ mm et $D \leq 80$ mm,

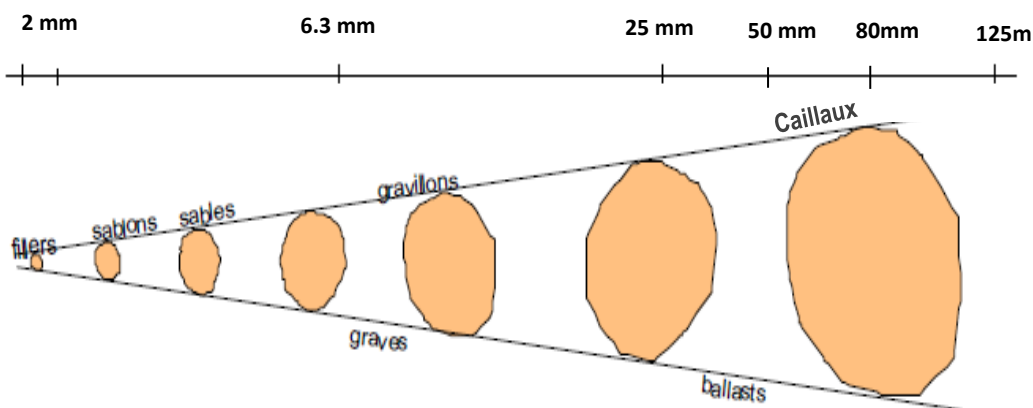


Figure. II.2.Les classes granulaires

II.2. Selon la nature minéralogique :

Les granulats sont caractérisés par son nature minéralogique :

- **Roches magmatiques** : granulat de bonne qualité : le granit, le quartz.
- **Roches sédimentaires** : non recommandé pour le béton comme le calcaire et Les dolomies.
- **Roches métamorphiques** : non recommandé pour le béton comme le schiste.

II.3. Selon les caractéristiques géométriques :

- La granularité.
- La forme des granulats : comme le coefficient d'aplatissement et l'indice forme.

II.4. Selon l'origine des granulats :

Elles sont soit naturelle, artificielle où recyclé :

a. Les granulats naturels :

D'origine minéral n'ayant subi aucune transformation autre que mécanique (pendant l'opération de concassage). Dans cette catégorie se rangent les granulats de roches tels que le calcaire, les roches magmatiques. Indépendamment de leur origine minéralogique, on classe les granulats en deux catégories :

- **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.



Figure. II.3. granulats roulés.

- **Les granulats de carrière** : dits concassés sont obtenus par abattage et concassage, ce qui leur donne des formes angulaires. Une phase de pré-criblage 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. La sélection de ce type de granulats devra donc être faite avec soin et après accord sur un échantillon.



Figure. II.4. granulats concassés ou semi-concassés

b. Les granulats artificiels : Granulats légers d'origine minérale résultants d'un procédé industriel comprenant des modifications thermiques ou autres. Dans cette catégorie se rangent des granulats transformées comme le schiste expansé, l'argile expansée...etc. Généralement on classe les granulats artificiels en trois sous classe:

- **Sous-produits industriels, concassés ou non :** Les plus employés sont le laitier cristallisé concassé et le laitier granulé de haut fourneau obtenus par refroidissement à l'eau. La masse volumique apparente est supérieure à $1\,250\text{ kg/m}^3$ pour le laitier cristallisé concassé, 800 kg/m^3 pour le granulé. Ces granulats sont utilisés notamment dans les bétons routiers.
- **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). (Voir figure II.5 :(a) granulats allégés ; (b) le laitier cristallisé concassé ; (c) granulats ferreux
- **Granulats allégés par expansion ou frittage :** Ces granulats, très utilisés dans de nombreux pays comme les Etats- Unis, bien qu'ils aient des caractéristiques de résistance, d'isolation et de poids très intéressants. Les plus usuels sont l'argile ou le schiste expansé et le laitier expansé). D'une masse volumique variable entre 400 et 800 kg/m^3 selon le type et la granularité, ils permettent de réaliser aussi bien des bétons de structure que des bétons présentant une bonne isolation thermique. Les grains de poids

intéressants puisque les bétons réalisés ont une masse volumique comprise entre 1200 et 2000 kg/m³.

Exemple : Argile expansée, pouzzolane, billes de verre.



Figure. II.5 b. Les granulats artificiels

c. Les Granulats recyclé : Résultats de la transformation des matériaux inorganiques antérieurement utilisés dans la construction tels que le béton concassé, le ballast, briques ...etc.

III. Fabrication (exploitation des gisements) :

La production des granulats nécessite deux principaux types d'opérations : l'extraction et le traitement.

- L'extraction s'effectue dans des carrières qui utilisent des techniques différentes selon qu'il s'agit de roches massives ou de granulats alluvionnaires meubles, soit à sec, soit en milieu hydraulique.
- Le traitement est réalisé dans des installations de traitement généralement situées sur le site de la carrière. Parfois les installations peuvent se situer à un endroit différent du site d'extraction.

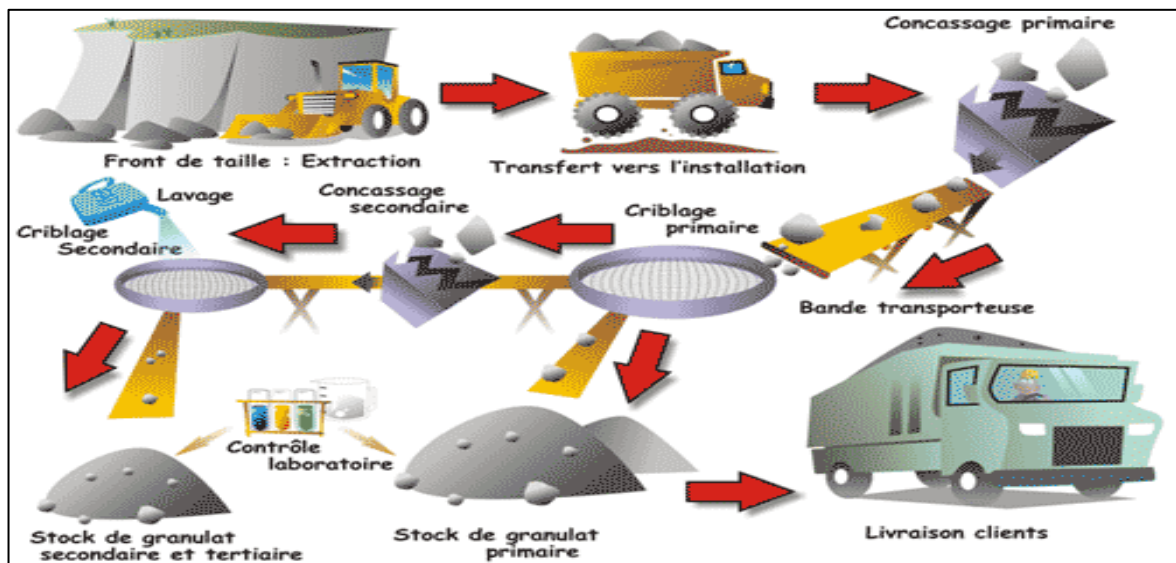


Figure. II.6. Les différents étapes de fabrication des granulats

III.1. Extraction : L'extraction se fait dans les carrières. On distingue :

- Carrières à ciel ouvert
- Carrières souterraines.

a. Carrières à ciel ouvert : L'exploitation en terrain meuble se fait soit manuellement (Pelle, pioche, pics etc...), soit mécaniquement (Pelles mécaniques, excavateurs, chargeurs, mobiles, bulldozer, scrapers, etc...), soit par des explosifs si le terrain dur ou compact.

b. Carrières souterraines : On peut être amené à exploiter une carrière souterraine si aucun gisement en surface n'existe dans la région.

III.2. Traitement:

a. Concassage : Le rôle de concassage est principalement réduire les dimensions des éléments pour obtenir la granularité souhaitée, et accessoirement pour améliorer leur forme.

b. Criblage : La classification des produits par grosseur se fait à la sortie de chaque concassage au moyen de grilles ou tamis oscillants ou tournants (trommels). Les opérations de criblage sont complétées par celles de dépoussiérage et de lavage.

C. Le lavage : Le lavage, omniprésent dans les gisements de roches alluvionnaires où l'eau ne manque pas.



Figure. II.7. Procédure de lavage des granulats

Le lavage permet aussi une classification des sables en réalisant des séparations impossibles à effectuer par criblage classique (entre 10 et 150 μm). Les modes de traitement utilisent des courants d'eau par gravité, centrifugation, courants de surface ou ascendant, ou par vibration, entraînant une séparation Sable-Eau pollué.

Granulats	Obtenus par	A partir de
Roulés	Criblage	Matériaux alluvionnaires
	Lavage	
Concassés	Concassage	Roches éruptives
	Criblage	Sédimentaires
	Lavage	Métamorphiques

Tableau .II.1

IV. Caractéristiques des granulats :

Les propriétés physiques et mécaniques des granulats dépendent de plusieurs facteurs. Généralement on souhaite obtenir un matériau résistant, étanche et durable. Pour atteindre ce but, il faut :

- un maximum de granulats par unité de volume de matériau (pour réduire la quantité de pâte liante nécessaire pour remplir les vides) ;
- choisir un diamètre maximum 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 ;
- Réduire la teneur en éléments fins au minimum requis pour obtenir une bonne maniabilité. La teneur maximale admise permet également d'améliorer la compacité de la matrice et donc augmenter les résistances mécaniques. Donc pour définir les différentes caractéristiques des granulats, divers essais de laboratoire sont effectués :
- Analyse granulométrique tamisage (NF P18.560)
- Analyse granulométrique par sédimentométrie (NF P94-057)
- Essai d'équivalent de sable (NF P18.598)
- Essai de propreté du gravier (NF P18-591)
- Essai de fragmentation par choc « essai Los Angeles » (NF P18-573)
- Essais d'usure « essai de Micro-Deval » (NF P18-572.)

Pour assurer la justesse des essais Il faut que l'échantillon utilisé au laboratoire soit représentatif de l'ensemble. Cette opération est généralement difficile, prend du temps et,

parfois est coûteuse, mais elle est essentielle. Deux procédés de base, assez satisfaisant:
Par quartage et à l'aide d'échantillonneurs (FigII.8).

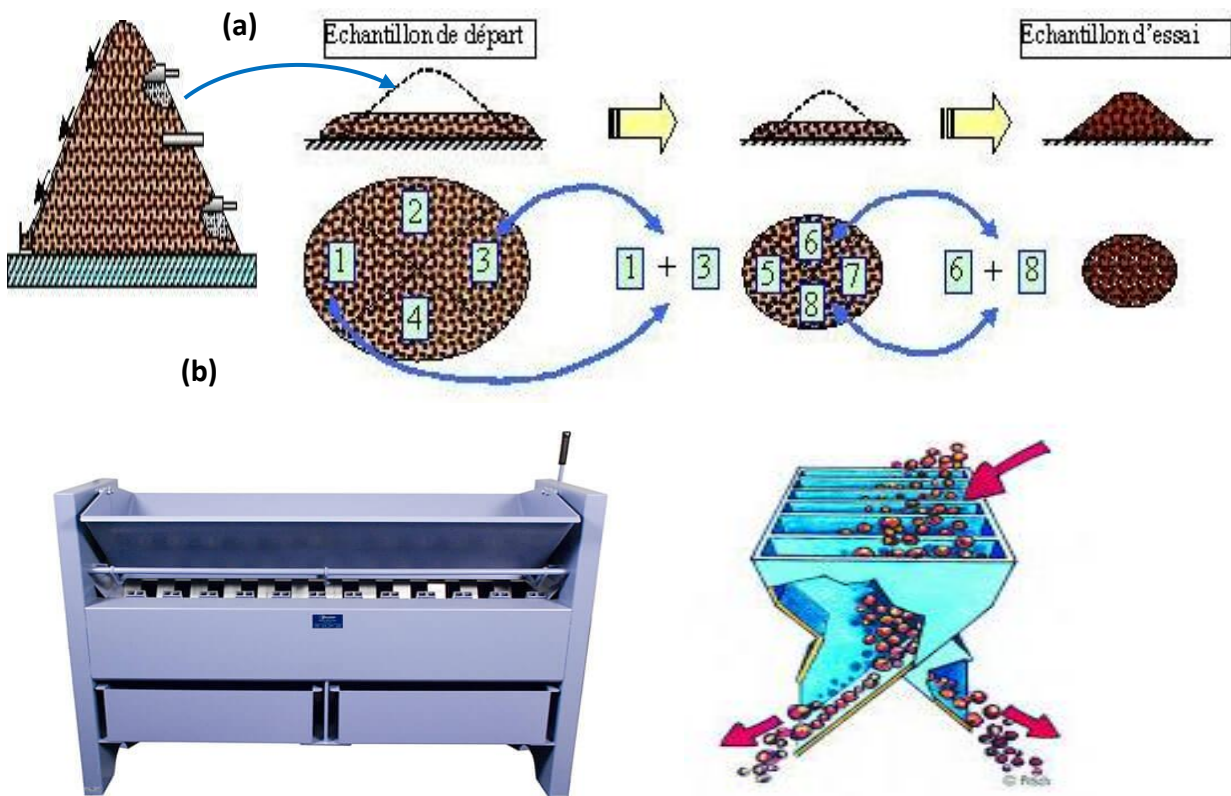


Figure. II.8. (a)Opération de quartage (b) échantillonneur pour gravier

IV.1. Caractéristiques géométriques :

IV.1.1.Granulométrie (analyse granulométrique) : L'analyse granulométrique consiste à déterminer la distribution dimensionnelle des grains constituant un granulat dont les dimensions sont comprises entre 0 et 125 mm. On appelle :

REFUS sur un tamis : la quantité de matériau qui est retenue sur le tamis.

TAMISAT (ou passant) : la quantité de matériau qui passe à travers le tamis.

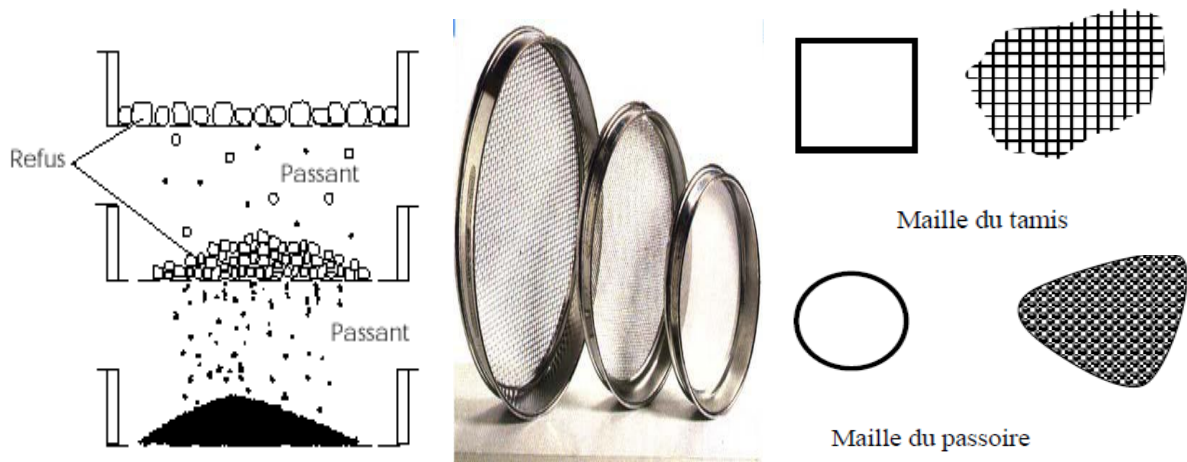


Figure. II.9. Essai analyse granulométrique par tamisage

- L'essai consiste à classer les différents grains constituant l'échantillon en utilisant une série de tamis, emboîtés les uns sur les autres, dont les dimensions des ouvertures sont décroissantes du haut vers le bas. La série principale : 0.063 -0.125 -0.25 -0.5 -1 -2 -4 -8 16 -31.5 ...



Figure. II.10. Les étapes de l'analyse granulométrique

- Le matériau étudié est placé en partie supérieure des tamis et le classement des grains s'obtient par vibration de la colonne de tamis et après lavage des grains pour éliminer la poussière.

- Les masses des différents refus et tamisât sont rapportées à la masse initiale du matériau. Les pourcentages ainsi obtenus sont exploités sous forme graphique.
- On considère que le tamisage est terminé lorsque le refus ne varie pas de plus de 1 % entre deux séquences de vibration de la tamiseuse. On trace la courbe granulométrique sur un graphique comportant en ordonnée le pourcentage des tamisât sous les tamis dont les mailles D sont indiquées en abscisse selon une graduation logarithmique. (voir Fig.II.11.

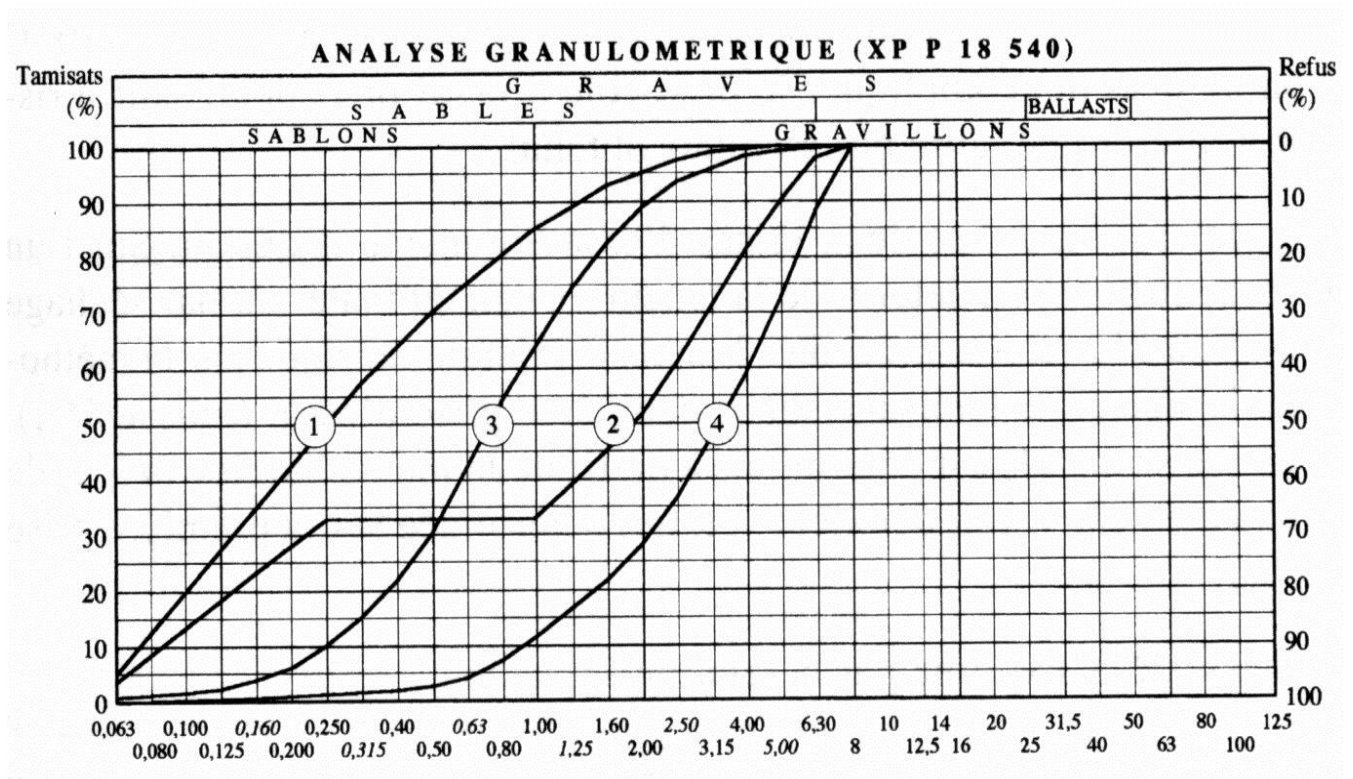


Figure. II.11. Courbes granulométriques dans différents cas

À partir de la courbe granulométrique on peut définir la classe granulaire du granulat utilisé.

Exemple : sable 0/5; gravier 5/25

Le coefficient de Hazen d'uniformité des granulats : La notion de granulométrie étalée ou granulométrie serrée est mise en évidence par un coefficient d'uniformité ou coefficient de HAZEN noté « Cu » :

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}$$

D_{60} , D_{10} : représentent respectivement les diamètres des éléments correspondant à 60%, et 10%, de tamisât cumulé. Ce coefficient est donc immédiatement calculé à partir de la courbe granulométrique :

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

Le coefficient de courbure « C_c » des granulats : Ce coefficient vient en complément de **Cu** dans la classification des granulats afin de déterminer si la granulométrie est bien graduée ou mal graduée :

$$C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{10}D_{60}}$$

D_{10} , D_{30} , D_{60} représentent respectivement les diamètres des éléments correspondant à 10%, 30%, 60% de tamisât cumulé.

Pour : $1 < C_c < 3$ la granulométrie est dite bien graduée (continuité bien répartie)

Pour : $1 > C_c > 3$ la granulométrie est dite mal graduée (continuité mal répartie)

IV.1.2. Module de finesse d'un sable (M) (XP P 18-540) : Le module de finesse d'un granulat est égale au $1/100^e$ de la somme des refus, exprimés en pourcentage sur les différents tamis de la série suivante : 0.16 – 0.315 – 0.63 – 1.25 – 2.5 – 5 – 10 – 20 – 40 et 80 mm.

Le module de finesse étant presque exclusivement vérifié sur les sables, les tamis concernés sont : 0.16 – 0.315 – 0.63 – 1.25 – 2.5 – 5mm. Les sables doivent présenter une granulométrie telle que les éléments fins ne soient ni en excès, ni en trop faible proportion. S'il y a trop de grains fins, il sera nécessaire d'augmenter le dosage en eau du béton tandis que si le sable est trop gros, la plasticité du mélange sera insuffisante et rendra la mise en place difficile.

- Si $M_F < 1.8$: sable fin
- Si $1.8 < M_F < 2.2$: un sable est à utiliser si l'on recherche particulièrement la facilité de mise en œuvre au détriment probable de la résistance.
- Si $2.2 < M_F < 2.8$ sable optimale : convient bien pour obtenir une ouvrabilité satisfaisante et une bonne résistance avec des risques de ségrégations limités.
- Si $2.8 < M_F < 3.2$: correspond à des sables à utiliser pour la recherche de résistances élevées, mais on aura, une mauvaise ouvrabilité et des risques de ségrégation.
- Si $M_F > 3.2$: sable grossier

Pour le béton on doit avoir : $1,8 \leq M_F \leq 3,2$; "un bon sable" à béton donne un $M_F = 2,7$

Corrections d'un sable : Il n'est pas rare d'avoir un sable disponible présentant un "Mf" non satisfaisant. Une façon de le rendre convenable consiste à le mélanger à un autre sable de telle sorte que la combinaison des deux "M_F" permette l'obtention du " M_F " escompté. On utilise pour cela **la méthode d'ABRAMS**. C'est une règle de mélange de granulats basée sur l'obtention d'un module de finesse global à partir de la connaissance des modules de finesse des granulats à mélanger.

On dispose de deux sables "S₁" et "S₂" de module de finesse respective " M_{F1}" et " M_{F2}". On désire obtenir un mélange granulaire "S" de module de finesse " M_F".

Les pourcentages de "S₁" et "S₂" nécessaires pour obtenir le mélange "S sont tels :

$$S_1 \% = \frac{M_F - M_{F2}}{M_{F1} - M_{F2}} \times 100$$

$$S_2 \% = \frac{M_{F1} - M_F}{M_{F1} - M_{F2}} \times 100$$

Exemple : Soit : M_{F1}= 3,2 (sable grossier S1) et M_{F2}= 1.9 (sable fin S₂) et M_F= 2.7 (sable corrigé)

Proportion de sable 1 : $S_1 \% = \frac{2.7 - 1.9}{3.2 - 1.9}$

Proportion de sable 2 : $S_2 \% = \frac{3.2 - 2.7}{3.2 - 1.9} = 38.46\%$

IV.1.3. Forme des grains (NF P 18-561) : La forme d'un granulat est définie par trois grandeurs géométriques : la longueur « L », l'épaisseur « E » et la grosseur « G ». La forme des grains est caractérisée par un coefficient d'aplatissement « A » déterminé par un double tamisage et varie en fonction de la plus grande dimension des grains et de son épaisseur conventionnelle qui vérifient la relation : $\frac{G}{E} > 1.58$.

La forme des granulats influence sur :

- La facilité de mise en œuvre « l'ouvrabilité ».
- La compacité, donc le volume des vides à remplir par la pâte de ciment.

En générale, 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 (très mauvais compacité).
- **Aiguilles** : une dimension beaucoup plus grande que les deux autres (très mauvais compacité).

IV.2.Caracteristiques physiques :

IV.2.1.La masse volumique apparente (NF P 18-554 et –555) : est la masse d'un corps par unité de volume total y compris les vides entre les grains et le constituant (volume apparent). Les granulats stockés sur chantier sont souvent humides. Leur teneur en eau notée $w(\%)$, déterminée sur petit chantier par séchage et pesées, doit être connue afin de déduire la quantité d'eau apportée lors d'un dosage de béton.

Les sables foisonnent (augmentation de volume pouvant atteindre 20 à 25 % pour des teneurs en eau de 4 à 5 %). Le coefficient de foisonnement est donné par : $f = (V_h - V_{sec})/V_{sec} (\%)$.

Généralement la masse volumique apparente est entre 1400kg/m^3 et 1600kg/m^3 .

IV.2.2.Masse volumique absolue : est la masse d'un corps par unité de volume de matière pleine sans aucun vide entre les grains (volume absolu). Elle est comprise entre 2500 et 2600 kg /m^3 .

IV.2.3.Porosité : C'est le rapport (en %) du volume des vides contenu dans les grains au volume des grains. Elle est très faible pour les granulats courants, importante pour les granulats légers.

IV.2.4.Compacité : Pour les granulats courant on admettre que la compacité en vrac est de l'ordre de 0.7 à 0.60 pour les sables et de 0.65 à 0.55 pour les graviers selon qu'ils sont tassés ou non.

IV.2.5. Propreté des granulats : Les granulats employés pour le béton doivent être propres, car les impuretés perturbent l'hydratation du ciment et entraînent des adhérences entre les granulats et la pâte. La propreté désigne : d'une part, 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. D'autre part, les impuretés susceptibles de nuire à la qualité du béton, parmi lesquelles on peut citer les scories, le charbon, les particules de bois.

Pour les cailloux et gravillons : c'est le pourcentage de passant au tamis de 0,5 mm ; le seuil est fixé à 2 % et 5 % pour des granulats concassés.

Pour un sable : à l'aide de deux types d'essais on peut évaluer la propreté des sables, évaluation quantitative des fines à l'aide de l'essai de l'équivalent de sable (NF P 18.598).et autre qualitative à l'aide de l'essai au bleu. La propreté est définie par l'essai d'équivalent de sable sur la fraction 0/5 mm . L'essai consiste à séparer les floccules fins contenues dans le sable. Une procédure normalisée permet de déterminer un coefficient d'équivalent de sable qui quantifie la propreté de celui-ci.

On lave l'échantillon, selon un processus normalisé et on mesure les éléments suivants :

– **hauteur $H1$** : sable propre + éléments fins.

_ **Hauteur $H'2$** : sable propre seulement.

Il existe 2 types de mesures en fonction du degré d'argilosité du matériau. En effet pour les sols par exemple, la mesure de la hauteur $H'2$ peut être délicate, on substitue à l'essai visuel, l'essai au piston.

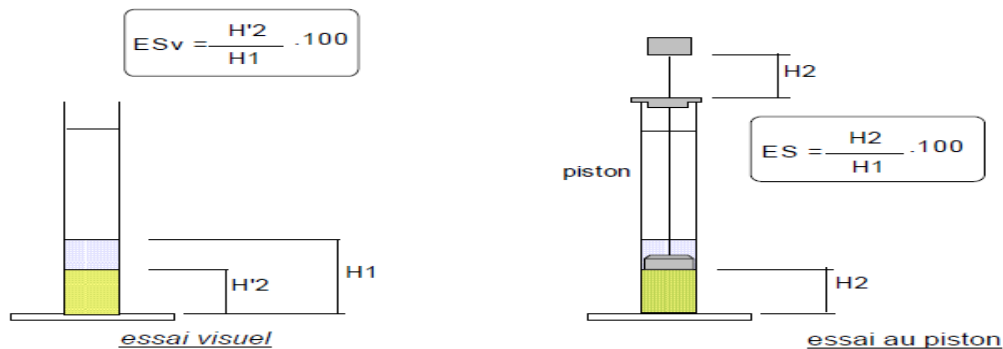


Figure. II.12. Détermination de l'équivalent de sable visuel et par piston

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

Tableau .II.2. : Valeurs préconisées pour l'équivalent de sable

Plus l'équivalent de sable est élevé, moins le matériau contient d'éléments fins nuisibles. Il s'applique assez bien aux sols faiblement plastiques et peut s'appliquer à tous les matériaux grenus. Il s'effectue sur les fractions inférieures à 5 mm.

IV.3.Caracteristiques mécanique :

Les caractéristiques mécaniques des granulats ne sont pas déterminées par des essais habituels de traction ou de compression. Par contre, il existe des essais tentant de reproduire certaines sollicitations propres à des usages spécifiques des granulats, par exemple le degré d'usure pour les granulats utilisés pour les bétons routiers.

IV.3.1. Essai de fragmentation dynamique et essai Los Angeles (NF P 18-573) : L'essai consiste à mesurer la masse m d'éléments inférieurs à 1,6 mm, produits par la fragmentation du matériau testé (diamètres compris entre 4 et 50 mm) et que l'on soumet aux chocs de boulets normalisés, dans le cylindre de la machine Los Angeles en 500 rotations. Si « M » est la masse du matériau soumis à l'essai et « m » la masse des éléments inférieurs à 1,6 mm produits au cours de l'essai, la résistance à la fragmentation aux chocs est exprimé par le coefficient Los Angeles LA :

$$LA = \frac{m}{M} \times 100$$



Figure. II.13. essais Los Angeles

Coefficient LA	Nature de la roche	Coefficient LA	Nature de la roche
< 20	<i>Très dure</i>	30 à 40	<i>Mis dure</i>
20 à 25	<i>dure</i>	40 à 50	<i>tendre</i>
25 à 30	<i>Assez dure</i>	> 50	<i>Très tendre</i>

Tableau.II.3. Catégories des granulats selon la résistance aux chocs

Exemple : Quartzites : LA = 15 ; Silex : LA = 19 ; Granite : LA = 20 ; Calcaires : 15 < LA < 100.

Remarque : Plus le coefficient Los Angeles est petit plus la roche est bonne, ce qui se traduit .en résistance du béton composé avec, car la dureté est synonyme de très grande résistance. Dans la pratique le coefficient est bon (bon béton) lorsque le résultat obtenu est inférieur à 35.

En pratique un moyen de contrôle plus simple consiste de placer le granulat entre deux plaquettes d'acier de 5 mm d'épaisseur et de le soumettre à une pression statique. Dans ces conditions un gravillon 5/10 doit résister à une pression de 16 kg ; pendant que un gravillon 10/20 doit résister à une pression de 26 kg.

IV.3.2. Essai Micro-Deval (EN 1097-1) : Une bonne résistance du granulat permet d'éviter des modifications de la granularité lors du malaxage et du transport dans le malaxeur (usure lors de la rotation de la toupie du malaxeur), donc on évite de modifier les propriétés du béton (résistance et ouvrabilité). L'essai Micro Deval est un essai dont le principe est de reproduire, dans un cylindre en rotation, des phénomènes d'usure. 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 Micro-deval « M_{DE} » calculé à partir du passage au tamis de 1,6 mm, mesuré en fin d'essai, caractérise le granulat.

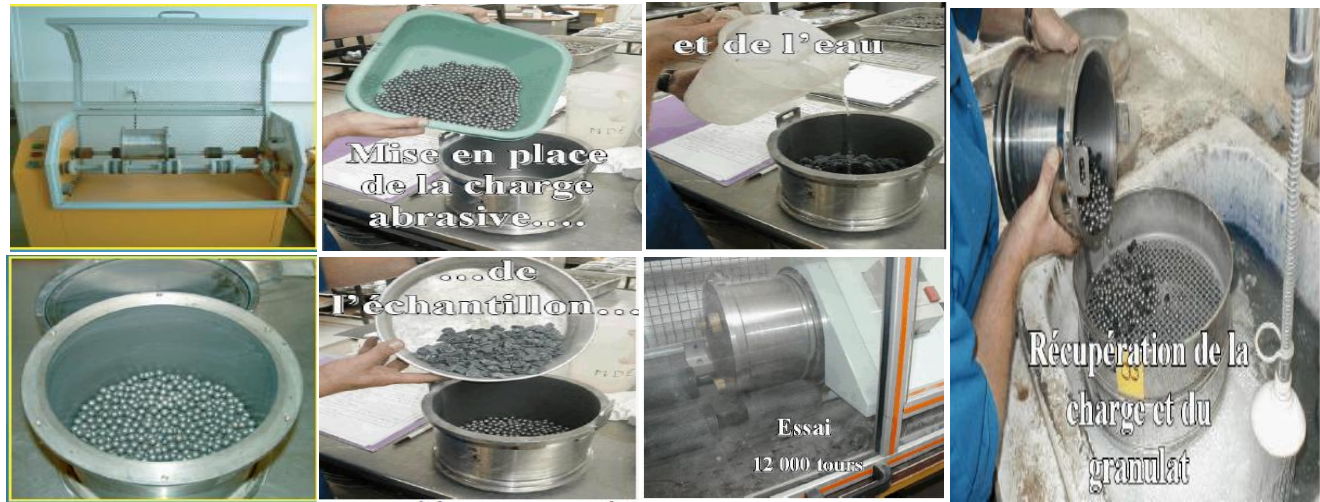


Figure. II.14. essais Micro Deval

L'essai consiste à Introduire un échantillon de masse initiale « M » avec la charge abrasive (avec 5 kg de billes métalliques calibrées) et 2.5 litres d'eau dans des cylindres en rotation (12000 tours) pendant 2 h (100 tour/minutes). Le refus de tamis 1.6mm est pesé après séchage (m).

$$M_{DE} = \frac{m}{M} \times 100$$

La résistance à l'usure est très importante pour des granulats de chaussée, surtout la couche de roulement, un bon coefficient M_{DE} est demandé.

Exemple : Quartzites $M_{DE} = 5$; Granite : $M_{DE} = 10$; Calcaires : $12 < M_{DE} < 100$

IV.4.Caracteristiques Chimique :

IV.4.1. La Teneur en 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.

IV.4.2. 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.

IV.4.3. 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 %.

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.

V. Différents types des granulats :

V.1. Les fillers : Ce sont les matériaux inertes de finesse comparable à celle du ciment. Pour les grains les plus fins, l'analyse granulométrique ne peut être effectuée par tamisage on fait appel à la sédimentométrie qui consiste à mesurer la vitesse de chute des différents grains dans un liquide de densité et de viscosité connues.

Les fillers sont utilisés dans la confection de certains bétons dans le but d'obtenir une bonne compacité.

V.2. Le sable : C'est un matériau provenant de la désagrégation naturelle de la pierre siliceuse (quartz) et/ou du silex (silicium), Il se compose de grains meubles n'ayant aucune cohésion.

La dimension des grains peut varier de 0,15 à 4,76 mm ; si le grain est plus petit que 0,6 mm parle de "sable fin" ; s'il atteint presque 1,2 mm "sable moyen" et s'il atteint enfin presque 4,76 mm, c'est le "gros sable" ; ce dernier ayant des grains de plus de 2 mm ressemble à du gravier fin, appelé alors "sable graveleux".

V.2.1 Les différents types de sable : On le distingue selon leur provenance : Le sable naturel et le sable artificiel.

a. Le sable naturel :

- **Le sable de rivière (fluvial) :** il est constitué de grains durs et arrondis ayant tous les calibres, il est très pur (lavé par l'eau).
- **Le sable de mer :** il provient des roches sous-marines ou de falaises érodées ; il est préférable de rincer ce sable à l'eau douce car il contient des sels qui sont néfastes surtout pour les ouvrages en béton armé. Ce sable peut être utilisé sous réserve de se débarrasser de son sel par un lavage
- **Le sable jaune :** ce type de sable peut contenant des particules d'argile, le limon et des restes organiques.
- **Le sable de dune :** complètement interdit pour les travaux en béton armé (riche en éléments fins).

b. Le sable artificiel : qui s'obtient en brayant mécaniquement de la pierre naturelle ou du laitier de haut fourneau, il est constitué de grains meubles n'ayant aucune cohésion. La dimension des grains peut varier de 0,15 à 4,7 mm et, comme le sable naturel, le

sable artificiel peut être fin, moyen ou gros suivant que la dimension des grains est inférieure à 0,6 mm ; 1,2 mm et 4,7 mm.

V.2.2. La qualité de sable : le sable destiné au béton ne doit comprendre qu'un minimum d'impuretés. Celle-ci sont formées principalement par l'argile, le limon, les éléments végétaux.

La propreté d'un sable se détermine par l'essai de l'équivalent de sable en laboratoire, mais aussi on peut évaluer leur propreté par des gestes simples sur chantier :

- Étaler du sable en le frottant sur un linge propre, après avoir enlevé le sable, il ne peut y avoir de souillure.
- Frotter du sable entre les doigts, il doit crisser dans la main et il ne peut y avoir des particules d'argile ou de boue collant aux doigts.

La dimension et la composition des grains doivent être adaptées au travail : le sable est d'autant meilleur qu'il est composé de grains de dimension différentes ; les grains moyens bouchent les vides entre les plus gros et les très fins bouchent entre les moyens, on obtient ainsi une bonne consistance, et on prescrit les modules de finesse suivants :

- Sable pour béton pour constructions : entre 3,40 et 1,40.
- Sable pour béton maigre pour fondations : entre 3,40 et 0,90.
- Sable pour mortier de maçonnerie et de carrelage : entre 1,70 et 0,90.

V.2.3. Utilisation du sable : Le sable d'employé lors de la préparation des mortiers, du béton et du béton armé. Son utilité est de réduire ce retrait et la fragilité du mortier causé

par le liant. Lors de la préparation du béton, il améliore la densité et en facilite le travail ; de plus le sable est l'élément économique du mortier et du béton.

V.3. Le gravillon : Le gravier est un agrégat pierreux d'origine naturelle et dont la dimension des grains est généralement comprise entre 2 et 80 mm ; le gravier provient soit du dragage des rivières, soit de l'extraction de carrière de gravier. Le gravier de rivière est essentiellement composé de grains arrondis provenant des roches tombées dans la rivière et étant entraînées par le courant.

Pour le béton, la dimension maximale des gravillons est limitée par les épaisseurs de la pièce mais également par la densité de ferrailage.

En pratique, la dimension maximale est souvent fixée à 40mm pour les ouvrages massifs et 25 mm pour les ouvrages courants et 15mm dans le cas de ferrailage très dense.

V.3.1. La qualité de gravier : Le choix d'un granulat est fait en fonction de certaines critères :

- Il ne doit pas contenir d'impuretés.
- Le gravier doit pouvoir résister aux intempéries : si le gravier est poreux, il pourra absorber de l'eau et se détériorer par la gelée.
- La résistance aux agents agressifs
- Le grain doit être suffisamment dur et résistant : la résistance à la compression du gravier pour bétonnage doit être au moins égale à celle du ciment employé après durcissement de ce dernier.

Exemple : la résistance à la compression de certaines roches utilisées pour la production du granulat : granite 190Mpa ; le basalte 250Mpa ; calcaire entre 30Mpa et 40Mpa

V.3.2. Utilisation du gravier : Le gravier peut s'employer :

- Lors de la fabrication ou la composition du béton et du béton armé.
- Lors de la fabrication de plaque de gravier lèvigé.
- En tant que matériau décoratif par exemple bacs de gravier pour décorer.

Chapitre III :

Les liants

I. Définition

II. Classification

II.1. Les liants hydrauliques

II.2. Les liants aériens

III. La chaux

III.1. Chaux aérienne

III.2. Chaux hydraulique

IV. Le ciment portland

IV.1. Principe de fabrication ciment portland

IV.2. Les principales catégories de ciment

IV.3. Influence des phases cristallines sur les propriétés du ciment

IV.4. Constituants principaux et additions

CHAPITRE III : Les liants.

I. Définition : Les liants sont des produits généralement employés sous forme de poudres fines et qui, gâchés avec l'eau en pâte plus au moins épaisse, durcissent et forment une masse dure et compacte analogue à la roche naturelle.

II. Classification : Ils existent deux catégories de liants : Liants aériens et liants hydrauliques :

II.1. Les liants hydrauliques : Les liants hydrauliques peuvent durcir, augmenter leur résistance mécanique lors qu'ils sont immergés dans l'eau, sans être au contact de l'air et c'est ça qui les différencie des liants aériens. Il existe deux types de liant hydraulique : la chaux et le ciment. Ces deux liants hydrauliques diffèrent de par leur mode de fabrication. Ils sont tous élaborés à partir de pierre calcaire principalement.

II.2. Les liants aériens : durcissent, augmentent leur résistance mécanique et se conservent à l'air libre. (Exemples : plâtre, chaux aérienne, liants magnésiens.)

III. La chaux :

La chaux est le produit de la cuisson d'un calcaire à une température environ 1000°C, suivi d'une extinction à l'eau. Les roches calcaires naturelles contiennent souvent des impuretés en particulier argileuses, selon le degré de pureté des calcaires utilisés on peut avoir de la chaux aérienne ou hydraulique.

III.1. Chaux aérienne : La chaux aérienne est obtenue par calcination d'un calcaire très pur (<10% d'impuretés argileuses) à une température variable de 1 050 à 1 250 °C.

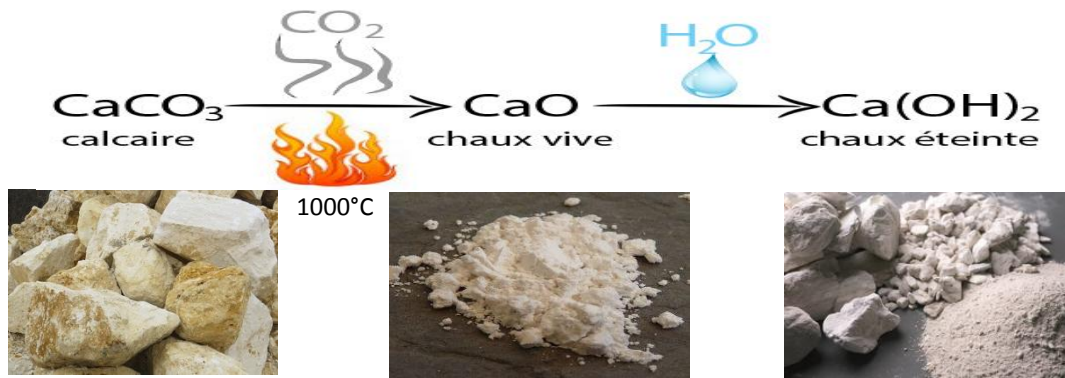


Figure. III.1 La chaux aérienne

La chaux aérienne n'est ainsi pas utilisée comme liant. Cependant elle peut être utilisée comme composant additif à certains matériaux de construction (mortiers, bétons, enduits, peintures...etc.), afin d'améliorer certaines de leurs propriétés. Dans la construction routière, on utilise parfois la chaux vive moulue pour améliorer certaines caractéristiques des sols.

III.2. Chaux hydraulique : Elle s'obtient à partir de roches calcaires contenant 10% à 20% d'impuretés argileuses (proche d'un ciment), contient en plus des silicates et des aluminates, car elle est fabriquée à partir de calcaires argileux. Elle est appelée « hydraulique » pour sa première prise : elle durcit en présence d'eau vive avant d'être plus ou moins lentement renforcée à l'air par carbonatation.

Plus la chaux hydraulique est fine plus prise et le durcissement sont accélérés et plus la résistance est élevée. L'utilisation de la chaux a progressivement diminué au profit du ciment même dans les secteurs où ses qualités étaient largement reconnues.

IV. Le ciment portland :

Les ciments portlands occupent la première place parmi les liants servant à lier les matières solides tels que le sable, graviers et cailloux. La naissance de ces produits

résultait de combinaison entre la silice, l'alumine, l'oxyde de fer et la chaux. Le ciment est appelé liant hydraulique, car il a la propriété de s'hydrater et de durcir en présence d'eau. Ce durcissement est dû à l'hydratation de certains composés minéraux, notamment des silicates et des aluminates de calcium.

IV.1. Principe de fabrication ciment portland : Le constituant principal du ciment portland est le clinker qui est obtenu à partir de la cuisson d'un mélange approprié 80% de calcaire et 20% d'argile. La cuisson à 1 450°C de ce mélange à une température de 1450°C donne une roche artificielle appelée Clinker. Le clinker est ensuite broyé avec environ 5% de gypse pour donner du ciment Portland artificiel (C.P.A.).

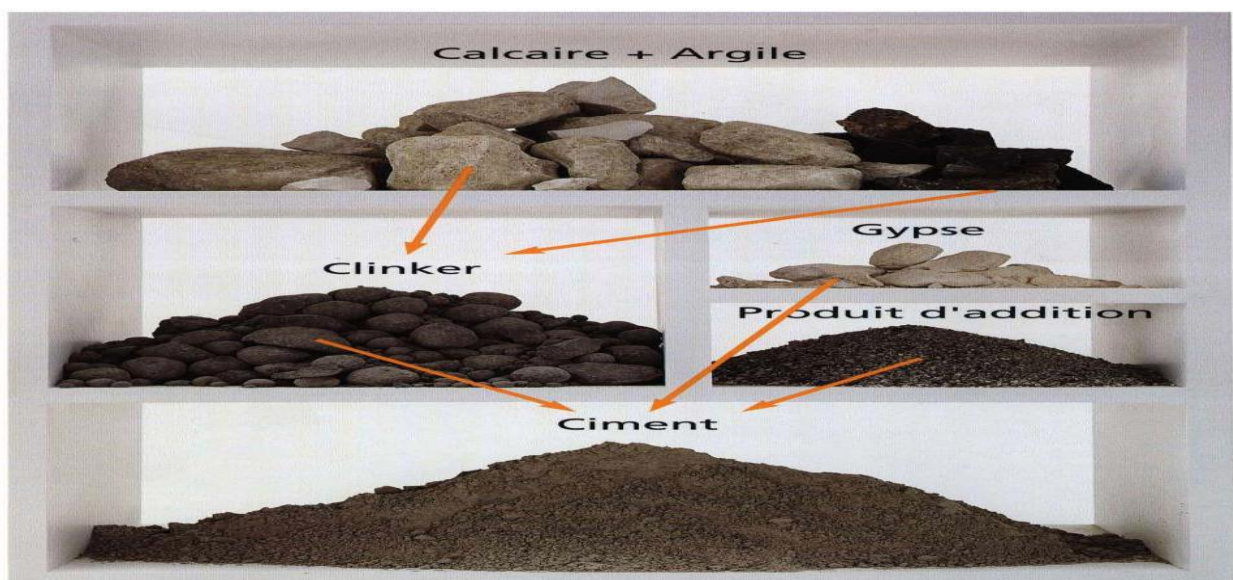


Figure. III.2. La composition chimique de ciment Portland ordinaire

La fabrication du ciment comporte les étapes suivantes :

a. Extraction de la matière première (le calcaire) : Les matières premières sont extraites de carrières généralement à ciel ouvert. On a recours actuellement à l'utilisation d'explosifs (tirs de mine) pour faciliter l'extraction de la roche.

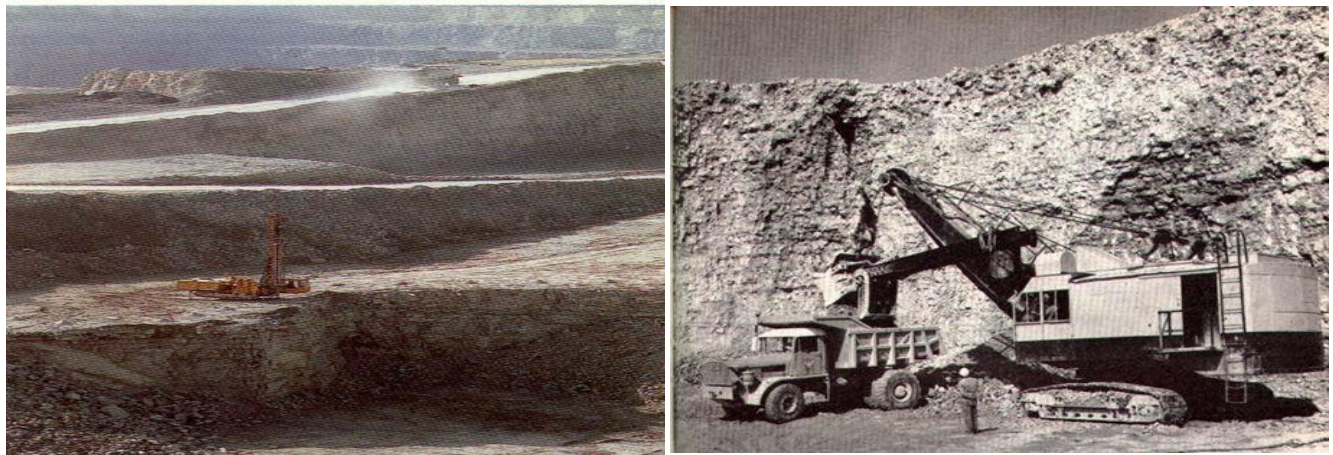


Figure. III.3.Carrière à ciel ouvert

b. Concassage : Les blocs obtenus sont transportés vers l'atelier de concassage et réduits dans en éléments d'une dimension maximale de 50 mm. Ces concasseurs sont situés parfois sur les lieux même de l'extraction.

c. Préparation du cru : au cours de laquelle on réalise le mélange homogène du calcaire et de l'argile dans des proportions définies en fonction de leurs compositions chimiques particulières. Il existe 4 procédés de fabrication du ciment suivant l'état de la nature des matières premières et suivant certaines conditions économiques :

- **La voie humide :** Après extraction en carrière et concassage des pierres, Les blocs sont déversés dans un bassin de délayage (alimenté d'eau), à l'intérieur duquel tourne qui divise la matière. La pâte sortant des bassins de stockage alimente un four rotatif d'acier qui a une vitesse d'un tour / mn. La pâte perd son eau dans le four puis se clinkérise vers 1 450°C. Le clinker est ensuite refroidi.

- **La voie semi-humide :** consiste à filtrer la pâte réalisée de façon analogue à la voie humide mais, après filtration, à en faire des boudins qui sont ensuite cuits sur une grille.

- **La voie sèche (poudre)** : est la technique la plus utilisée aujourd'hui. Après concassage du calcaire et séchage de l'argile, les matériaux sont ensuite déversés dans un hall appelé hall de pré-homogénéisation. La pré-homogénéisation permet d'atteindre un dosage parfait des deux constituants essentiels du ciment. La poudre obtenue alimente un four rotatif long d'environ 150 m de long et 4 m de diamètre. Ce four est composé de deux parties. Une partie verticale appelée le pré-chauffeur où la poudre chauffée descend par gravité et une partie horizontale où la poudre est clinkérisée. Le clinker est ensuite refroidi puis stocké.
 - **La voie semi-sèche** : consiste à humidifier la poudre obtenue pour l'agglomérer sous forme de granules qui sont ensuite cuits sur une grille mobile.
- c. Pré-homogénéisation** : cette phase consiste à déposer les matériaux constitutifs du cru en couches successives, de faible épaisseur, formant le tas de pré-homogénéisation.



Figure. III.4. hall de la pré-homogénéisation

La pré-homogénéisation permet d'atteindre un dosage parfait des deux constituants essentiels du ciment.

d. 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.



Figure. III.5. Broyeur à boulets

f. Homogénéisation : c'est au cours de cette phase que grâce à un brassage ou mécanique vigoureux, peut être obtenu un produit parfaitement homogène, de caractéristiques chimiques uniformes, apte à être cuit.

g. Cuisson : réaliser dans des fours rotatifs a une température comprise entre 1400 et 1500 °C dont les dimensions les plus courantes sont de l'ordre de 4 à 5 m de diamètre et de 60 à 100 m de longueur dans le procédé par voie sèche (de 150 m dans le procédé par voie humide).

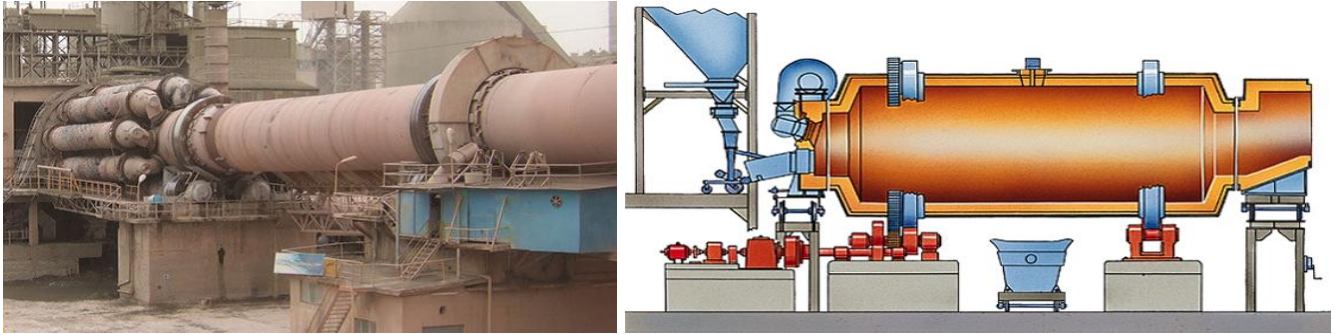
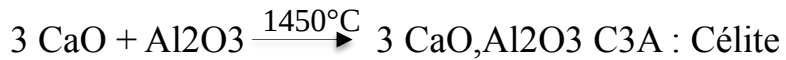


Figure. III.6. Four rotatif horizontal

Ce four est légèrement incliné et tournant à environ 1 tour /minute. La cuisson permet la transformation du cru en clinker. 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.



A l'issue de la cuisson, nous obtenons quatre phases cristallines :

- 15 à 25% de Silicate Bi-calcique (Bélite) C₂S
- 45 à 65% de silicate tricalcique (Alite) C₃S
- 0 à 15 % d'aluminate tricalcique C₃A
- 0 à 10 % d'alumino-ferrite tétra-calcique C₄AF

L'alumino-ferrite tétra-calcique **C₄AF**, qui forme une solution solide de **C₂A** et **C₂F**, réagit moins vite que **C₃A** : son rôle est mineur dans la réaction de durcissement du ciment.

h. 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 suivant les types de refroidisseurs. Cette opération a une incidence sur la qualité du ciment, un refroidissement trop lent pouvant amener la libération de chaux libre et la transformation du C_3S en C_2S qui entraîne une baisse des résistances.

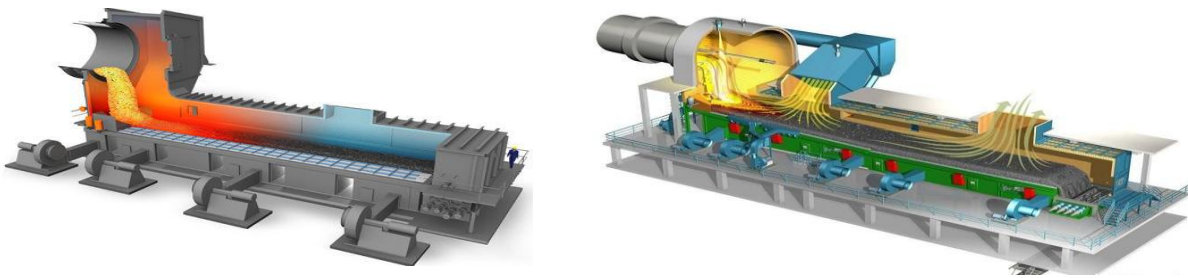


Figure. III.7. Refroidisseur

Les compositions chimiques et minéralogiques du clinker sont comprises dans les limites suivantes :

ELEMENTS	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₅	MgO	Na ₂ O+K ₂ O
%	62-67	19-25	2-9	1-5	0-3	1-1.5

Tableau.III.1.La composition chimique de Clinker de ciment Portland ordinaire

i. Broyage : il est réalisé en continu dans des broyeurs alimentés à partir des stocks de clinker et des différents constituants et ajouts (3 à 5% de gypse, le laitier de Haut-fourneau, les pouzzolanes...etc.). pour l'obtention de diverses catégories de ciment.

j. Stockage, ensachage et expédition : Les grains de ciment étant récupérés à la sortie du broyeur sont expédiés vers des silos de stockage. Ces silos sont cylindriques et de

capacité pouvant aller jusqu'à 10.000 tonnes. Le ciment qui est produit à un prix unitaire relativement bas, supporte mal, en coût, de longs transports.

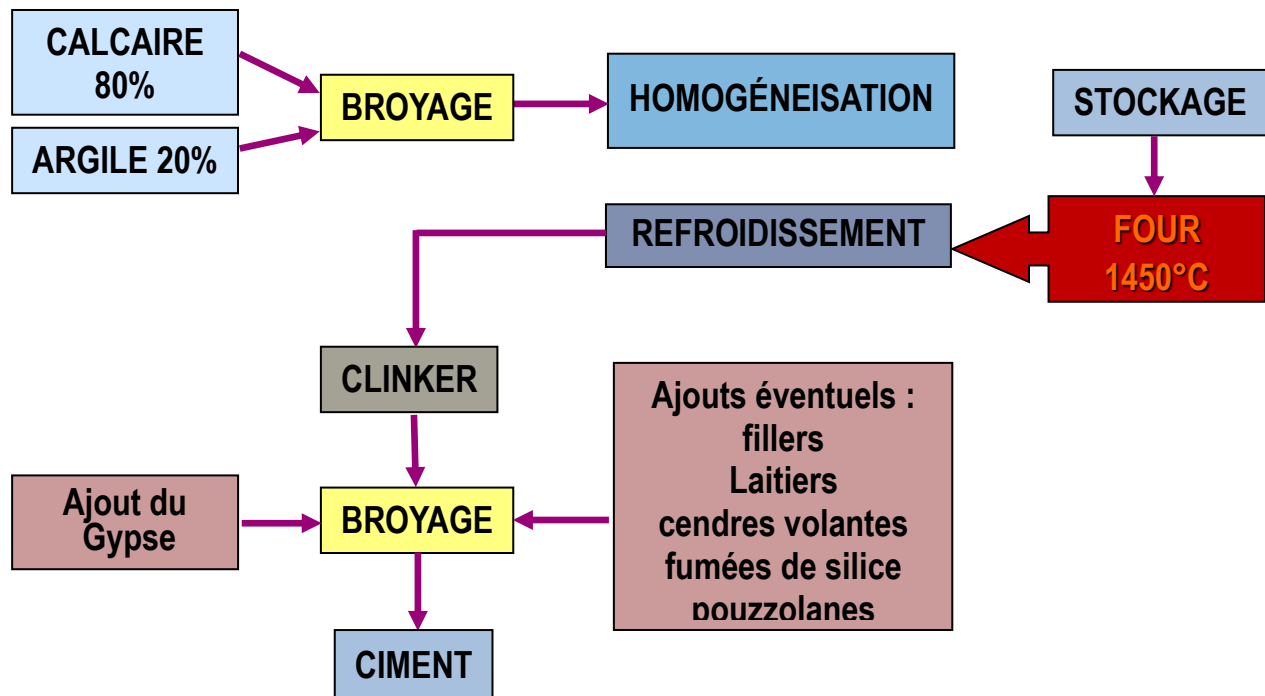


Figure. III.8 Le schéma de la fabrication du ciment

IV.2. Les principales catégories de ciment :

Les ciments peuvent être classés en fonction de leur composition et de leur résistance normale.

IV.2.1. Classification des ciments en fonction de leur composition :

Les ciments constitués de clinker et des constituants secondaires sont classés en fonction de leur composition, en cinq types principaux. Ils sont notés CEM et numérotés de 1 à 5 en chiffres romains dans leur notation européenne (la notation Algérienne est indiquée entre parenthèse) :

○ **CEM I : Ciment portland (CPA - dans la notation algérienne) :**

Sont destinés aux travaux de béton armé fortement sollicités, au béton précontraint, aux produits préfabriqués les plus performants : tuyaux, blocs, poutrelles, ainsi qu'aux usages spéciaux.

○ **CEM II /A ou B : Ciment portland composé (CPJ) :**

Sont utilisés pour la plupart des travaux d'usage courant en béton armé ou non, la maçonnerie, certains produits préfabriqués.

○ **CEM III : Ciment de haut fourneau (CHF) :**

Sont réservés aux travaux de fondation profondes, de grande masse et en milieu agressif (injection, pieux, élevages agricoles, terrains gypseux, eaux de mer ou eaux très pure...).

○ **CEM IV : Ciment pouzzolanique (CPZ) :**

Ciment contenant entre 45 et 90 % de clinker, le reste étant des pouzzolanes naturelles, des cendres volantes siliceuses ou de la fumée de silice. Ayant une bonne résistance mécanique, mais sensible au froid, il est destiné en particulier à des travaux massifs en béton armé ou précontraint, aux travaux maritimes et aux ouvrages étanches.

○ **CEM V : Ciment au laitier et aux cendres (CLC) :**

Ciment contenant entre 20 et 64 % de clinker, entre 18 et 50 % de laitier, le reste étant des pouzzolanes naturelles ou des cendres volantes siliceuses. Ses propriétés sont proches de celles du ciment de haut fourneau mais il est plutôt utilisé dans les milieux moyennement agressifs.

Dans le tableau suivant classe les différents types de ciment en fonction de leur composition et leur utilisation.

Ciment	Désignation	Utilisation	Contre-indication
Ciment portland	CEMI	✓ Tous travaux de béton armé	✓ Résistance d'eaux agressives
Ciment composé	CEMII	✓ Bonne résistance ✓ Décofrage rapide ✓ Bétonnage par temps froid	✓ Travaux souterrains ✓ Bétonnage en grande masse
Ciment au laitier et pouzzolanique ou au laitier et cendre	CEMIII CEMIV CEMV	✓ Béton de masse (barrage) ✓ Béton pour sol agressif ✓ Bétonnage en temps chaud ✓ Eau usée ✓ Travaux souterrains ✓ Réservoir d'eau	✓ Bétonnage par temps froid ✓ Béton préfabriqué ✓ Résistance à jeune âge élevée

Tableau .III.2.

IV.2.2. Classification des ciments en fonction de leur résistance normale : Trois classes sont définies par la valeur minimale de résistance à la compression (exprimée en Mpa) d'un ciment à 28 jours ; des sous classes "R" sont associées à ces 3 classes principales pour désigner des ciments dont les résistances au jeune âge sont élevées. Ces classes sont notées, classe 32.5, classe 42.5, classe 52.5.

Exemples :

CPA 32,5 : Ciment Portland Artificiel de classe 32,5 (Clinker $\geq 97\%$, Ajouts $\leq 3\%$).

CPJ 42,5 : Ciment Portland Composé de classe 42,5 (Clinker $\geq 65\%$, Ajouts $\leq 35\%$).

CHF 42,5 : Ciment de Haut Fourneau de classe 42,5 (Laitier de 65 à 75%).

IV.3. Influence des phases cristallines sur les propriétés du ciment :

Il faut noter que la composition chimique du ciment influe considérablement sur certaines caractéristiques de ce dernier :

- **La résistance mécanique :** Par exemple, l'Alite(C3S) agit principalement sur les résistances aux jeunes âges, plus le taux sera élevé, plus les résistances aux jeunes âges seront importantes. Par contre C2S, il agit principalement sur les résistances à long terme.
- **La résistance aux sulfates :** Les sulfates peuvent réagir avec le ciment en provoquant une expansion et une destruction. Le composant le plus vulnérable est le C3A. Un ciment résistant aux sulfates aura un faible taux de C3A.

IV.4. Constituants principaux et additions : Le ciment portland est composé de clinker moulu auquel on ajoute une quantité de gypse, destiné à régulariser la prise. Pour modifier les propriétés du ciment, on ajoute les autres constituants associés au clinker grâce à leurs caractéristiques chimiques ou physiques. Les constituants les plus utilisés sont :

- **Les Calcaires :** Les calcaires sont considérés comme un des constituants principaux du ciment. Ils doivent présenter une proportion de carbonate de calcium CaCO_3 supérieure à 75% en masse.
- **Le laitier :** Le laitier est un sous-produit de l'industrie métallurgique ayant des propriétés hydrauliques. Il est obtenu par refroidissement rapide (trempe) de certain

déchet provenant de la fusion du minerai de fer dans un haut fourneau. Il est composé essentiellement de silicates, d'aluminates et de chaux.

- **Cendres volantes (V ou W):** Elles sont les produits pulvérulents de grande finesse, récupérées par les systèmes de dépoussiérages des gaz des chaudières des centrales thermiques.
- **La fumée de silice :** La fumée de silice est un sous-produit de la fabrication du silicium (utilisé pour la fabrication des bétons à haute performance (BHP) à cause de leur finesse), de différents alliages de Ferro silicium ou de zircone.
- **Les Fillers :** Ce sont des “constituants secondaires” des ciments, donc ils ne peuvent jamais excéder 5 % en masse dans la composition du ciment. Ce sont des matières minérales, naturelles ou artificielles qui agissent par leur granulométrie sur les propriétés physiques des liants (maniabilité, pouvoir de rétention d’eau).

Chapitre IV :

Les mortiers

I. Définition

II. Composition

II.1. Le liant

II.2. Le sable

II.3. L'eau de gâchage

II.4. Les adjuvants

II.5. Les ajouts

III. Les différents types de mortier

III.1. Selon le type de liant utilisé

III.2. Selon le processus de fabrication

IV. Caractéristiques principales

IV.1. L'ouvrabilité

IV.2. La prise

IV.3. La résistance mécanique

IV.4. Retraits et gonflements

V. Qualité d'un bon mortier

VI. Emplois des mortiers

VI.1. Les joints de maçonnerie

V.2. Les enduits

V.3. Les chapes

V.4. Les scellements et les calages

CHAPITRE IV : Les mortiers

I. Définition :

Un mortier est un mélange de liant (ciment ou chaux), de sable et d'eau et éventuellement d'additions réalisé dans des proportions bien définies de manière à obtenir une pâte de plasticité convenable pour la mise en œuvre. Des compositions multiples de mortier peuvent être obtenues en jouant sur les différents paramètres: liant (type et dosage), adjuvants et ajouts, dosage en eau.

Il sert à lier les différents éléments constituant toute maçonnerie ou à exécuter des revêtements. Dans un mortier, le liant peut être du ciment, de la chaux ou un mélange des deux. 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.

II. Composition :

Comme on a vu dans la définition, le mortier est un matériau de construction, qui contient du ciment, sable, eau et éventuellement de l'adjuvant ou l'addition ou les deux à la fois.

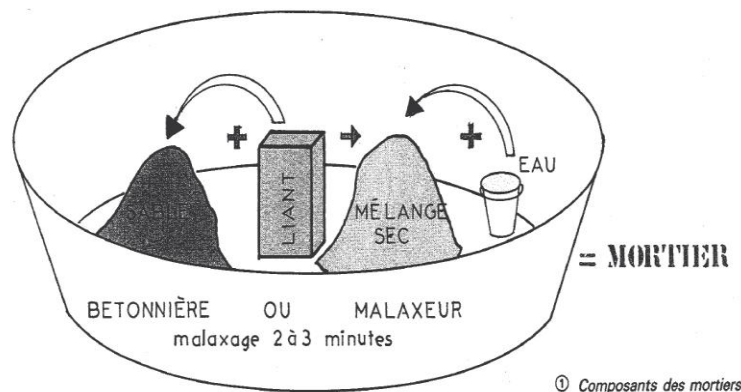


Figure. IV.1. Composants des mortiers

La composition se diffère selon le type de mortier recherché, selon la nature et les pourcentages des constituants, selon les propriétés du mortier désirées, selon la fonction à accomplir dans la réalisation de la construction. Etudions séparément chacun des composants :

II.1. Le liant :

C'est l'élément responsable de la cohésion des particules entre eux afin d'avoir un matériau cohérent et dur. Pour cela Quel qu'il soit, le liant employé doit être de bonne qualité. Son choix pour la confection d'un mortier est très important, il ne faut pas employer n'importe quel liant pour n'importe quel travail. On utilise souvent :

- Les ciments (gris ou blanc)
- Les chaux (hydrauliques naturelles, éteintes).
- les ciments spéciaux (alumineux fondu, ..)

Le choix et le dosage est en fonction de l'ouvrage à réaliser et son environnement.

II.2. Le sable :

Certains sables sont à éviter, notamment les sables très fins, les sables crus qui manquent de fines et les sables de dunes ou de mer qui contiennent des sels néfastes pour les constituants des ciments, par contre ils doivent être propres (exempt de terre et de matière végétale) .

Il ne doit pas comporter d'éléments très grossiers surtout pour les ouvrages à faible épaisseur (enduits lissés, chapes, etc). Normalement, les sables utilisés sont les sables appelés "sable normalisé" de bonne granulométrie (contenir des grains fins, moyens et

gros). Les grains fins se disposent dans les intervalles entre les gros grains pour combler les vides. Ils jouent un rôle important : Ils réduisent les variations volumiques, les chaleurs dégagées et même le prix.

Les dosages se feront en poids plutôt qu'en volume comme c'est souvent le cas, afin d'éviter les erreurs de dosage, par suite de l'augmentation de volume de sable humide (foisonnement du sable).

Le diamètre maximum des grains de sable utilisés pour les mortiers est:

- Extra-fins : jusqu'à 0,8 mm (en tamis), soit 1 mm (en passoire);
- Fins : jusqu'à 1,6 mm.
- Moyens : jusqu'à 3,15 mm.
- Gros : jusqu'à 5 mm.

II.3. L'eau de gâchage :

Elle fait se solidifier le liant hydraulique et donne toute sa prise au mortier. L'eau doit être propre, sans matière organique (On peut employer sans danger l'eau potable. Il faut éviter les eaux qui contiennent une forte proportion de sels (sulfates, chlorures) et les eaux usées. Il faut noter que l'excès d'eau est toujours nuisible, il diminue la résistance finale du mortier.

En générale, la quantité d'eau est fonction de la nature du liant utilisé, de l'humidité préalable du sable et de l'utilisation qu'on en fera de ce mortier.

Exemples :

- il faut environ 200 litres d'eau pour préparer un mètre cube de mortier dosé à 400 kg de ciment portland.
- Dans le cas d'emploi d'un mortier mou, il convient d'augmenter le dosage pour obtenir la même résistance, sauf pour les ciments alumineux pour lesquels cet excès est moins nuisible.
- Les mortiers de chaux demandent en général plus d'eau que les mortiers de ciment de même les mortiers composé de sable fin exige plus d'eau que ceux composés de sable moyen ou gras.

II.4. Les adjuvants :

Les adjuvants sont des produits chimiques que l'on utilise dans le cas des bétons. Ils modifient les propriétés des bétons et des mortiers auxquels ils sont ajoutés en faible proportion (environ de 5% du poids de ciment). Les mortiers peuvent comporter différents types d'adjuvants :

- Les plastifiants (réducteurs d'eau);
- Les modificateurs de prise (retardateurs, accélérateurs);
- Les hydrofuges.

II.5. Les Ajouts :

Les ajouts que l'on utilise dans les mortiers sont :

- Poudres fines pouzzolaniques (cendres, fumée de silice, filler...etc.)

- Fibres de différentes natures.
- Colorants (naturels ou synthétiques).
- **Remarque** : certains mortiers dits "bâtards" sont le résultat d'un mélange de sable avec deux liants, le plus souvent chaux et ciment, ou deux ciments différents.

III. Les différents types de mortier :

III.1. Selon le type de liant utilisé :

En fonction de types du mortier utilisé on obtient différents types de mortier:

III.1.1. 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. De plus, un dosage en ciment les rend pratiquement imperméables.

III.1.2. Les mortiers de chaux : Les mortiers de chaux sont moins résistants par rapport aux mortiers de ciment. La durée du durcissement des mortiers de chaux est plus lente que pour les mortiers de ciments.

III.1.3. Les mortiers bâtards : Ce sont les mortiers, dont le liant est le mélange de ciment et de chaux dans des proportions variables. 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.

Les ciments apportent la résistance mécanique et un durcissement plus rapide, et les chaux apportent leur plasticité.

III.2. Selon le processus de fabrication :

En fonction du processus de fabrication, on peut citer deux types de mortier :

III.2.1. Mortiers fabriqués sur chantier : La fabrication des mortiers sur chantier se fait à soit à main ou à l'aide des engins appelés bétonnières. Cependant il faut savoir :

- Que le mélange à sec doit être fait soigneusement pour que le liant soit parfaitement réparti dans toute la masse.
- Le sable est généralement dosé en poids (ce qui est préférable), soit en volume (cas des petits chantiers). Dans ce dernier cas, il est très important de tenir compte du phénomène de foisonnement des sables.
- Que l'eau doit être versée en plusieurs fois, d'abord pour la commodité et la qualité du mélange, ensuite parce qu'il est facile d'ajouter un peu d'eau alors qu'on ne peut pas en enlever.

III.2.2. Mortier industriel (prêt à l'emploi) : Ce sont des mortiers que l'on fabrique à partir de constituants secs, bien sélectionnés, conditionnés en sacs, contrôlés en usine et parfaitement réguliers

Les mortiers industriels se sont beaucoup développés ces dernières années, permettant d'éviter le stockage et le mélange des constituants sur des chantiers parfois difficiles d'accès. Aujourd'hui, on peut trouver dans les surfaces de bricolages des mortiers répondant à tous les besoins non seulement par la nature du produit, mais aussi par son conditionnement plus adaptés : sacs de 5 à 25kg.

Pour utiliser ce type de mortiers, il suffit de mettre la quantité d'eau nécessaire et malaxer pour ensuite les mettre en œuvre. Les fabricants de mortiers industriels proposent une gamme complète de produits répondant à tous les besoins :

- Mortiers pour enduits de couleur et d'aspect varié.
- Mortier de jointoiement.
- Mortier de scellement.
- mortier pour chapes.
- Mortier-colle pour carrelages, sur fond de plâtre ou de ciment, etc.,
- Mortier de réparation.

IV. Caractéristiques principales :

Les caractéristiques principales des mortiers sont :

- L'ouvrabilité.
- La prise.
- La résistance mécanique.
- Le retrait et Le gonflement, etc.

IV.1. L'ouvrabilité :

On peut la définir comme la propriété du mortier à s'étaler à la truelle pour colmater toutes les fentes et fissures de l'élément de maçonnerie. En réalité, c'est une combinaison de plusieurs propriétés, comprenant la plasticité, la compacité et la cohérence. Sur chantier L'ouvrabilité ne se mesure pas avec précision mais le maçon peut l'évaluer en observant le comportement du mortier lorsqu'il l'étale avec sa truelle.

En laboratoire, 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. On mesure le diamètre de la galette ainsi obtenue. L'étalement en % est donné par la formule :

$$E(\%) = \frac{D_r - D_i}{D_i}$$

Avec : D_r = diamètre final et D_i = diamètre initial

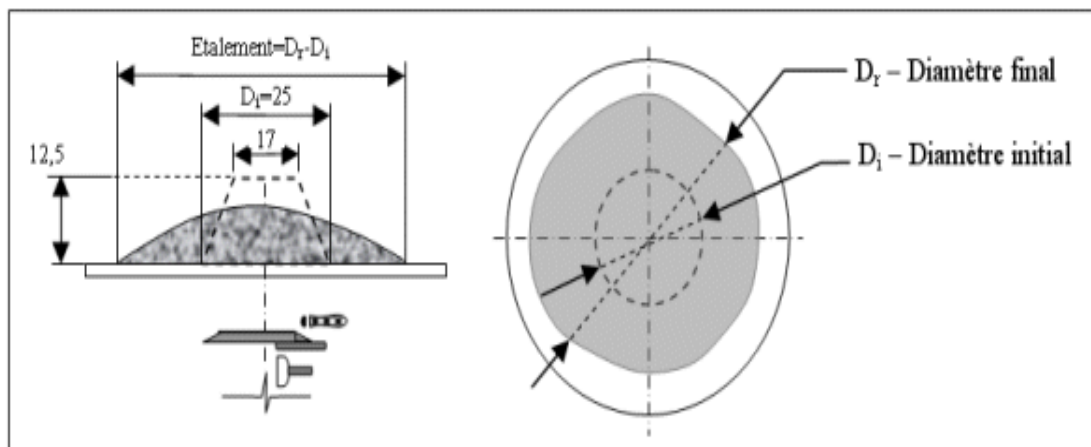


Figure. IV.2. Table à secousses

IV.2. La prise :

Elle est définie comme étant le changement d'état liquide à un état solide. Dès que le ciment en contact avec l'hydratation commence est les propriétés de mortier évoluent dans le temps.

Le temps de prise se mesure habituellement sur une pâte pure de ciment de consistance normale (24 à 30% d'eau) et conformément à la norme concernée (à l'aide de l'appareil de Vicat).

Lorsque L'essai a lieu sur mortier normal, il est gouverné par la norme NF P15-431. L'appareil utilisé est toujours l'appareil de Vicat, (figure ci-dessous), mais en plaçant une surcharge de 700 grammes sur le plateau supérieur. Le poids de l'aiguille pénétrant dans le mortier est de 1000 grammes.

Le début de prise est l'instant où l'aiguille s'arrête à 2,5 mm du fond (taille des plus gros grains de sable) et la fin de prise est l'instant où l'aiguille s'arrête à 2,5 mm du niveau supérieur. La figure ci-dessous représente un appareil de Vicat muni de l'aiguille avec une surcharge

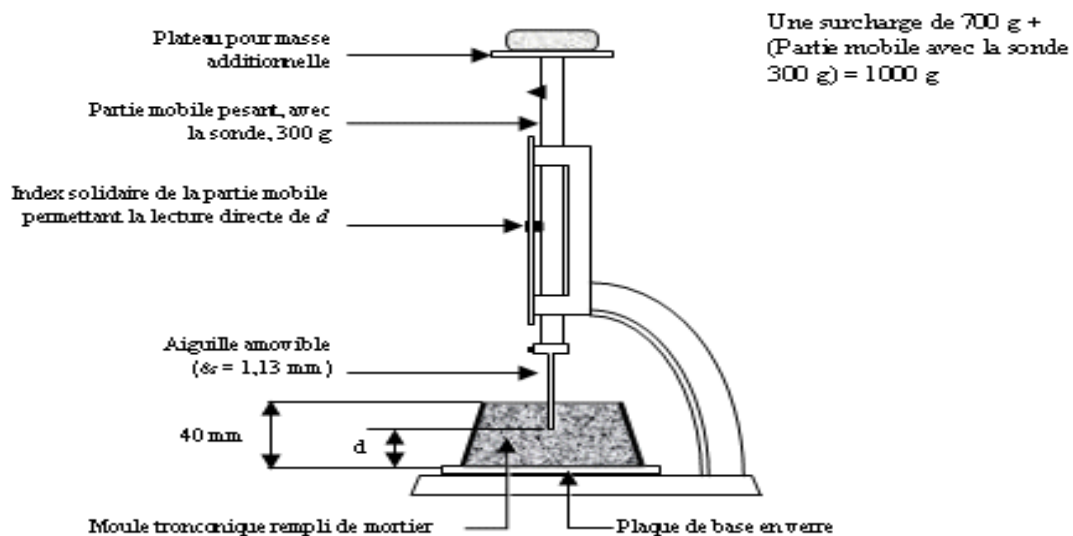


Figure. IV.3. Appareil de Vicat muni de l'aiguille avec une surcharge

IV.3. La résistance mécanique :

La résistance d'un mortier est directement dépendante du type de ciment donc, il s'agit de définir les qualités de résistance d'un ciment plutôt que d'un mortier. Les essais sur

les mortiers sont souvent effectués sur les éprouvettes prismatiques de 4 x 4 x 16 cm conservés dans l'eau à 20 °C.



Figure. IV.4. Moule pour moulage des éprouvettes de mortier

L'essai consiste à étudier les résistances à la traction et à la compression d'éprouvettes de mortier normal. Dans un tel mortier la seule variable est la nature de liant hydraulique ; la résistance du mortier est alors considérée comme significative de la résistance du ciment.

Les éprouvettes sont rompues en traction par flexion puis en compression. Les résistances, aussi bien en traction par flexion qu'en compression, progressent à peu près comme logarithme du temps (entre 1 et 28 jours). La résistance à la flexion est également importante, parce qu'elle détermine la capacité d'un mortier à résister à la fissuration. La figure ci-dessous représente le dispositif pour l'essai de résistance à la flexion.

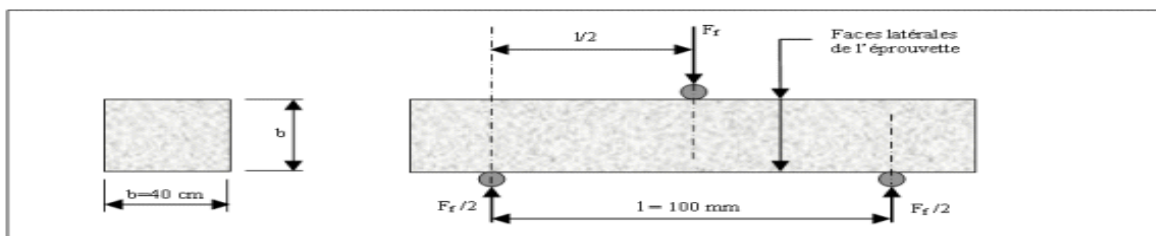


Figure. IV.5. Dispositif pour l'essai de résistance à la flexion.

Remarque : Les mortiers devraient toujours avoir moins de résistance que les éléments de maçonnerie pour que les fissures se produisent dans les joints, où elles peuvent être facilement colmatées.

IV.4. Retraits et gonflements :

Pendant leur prise, puis leur durcissement, les mortiers de ciment subissent un certain raccourcissement de leurs dimensions c'est ce qu'on appelle le retrait. L'importance du retrait est en rapport avec :

- **Le dosage :** un dosage excessif (mortier trop gras) accentue le retrait et de là, la fissuration.
- **La quantité d'eau de gâchage :** Celle-ci joue un très grand rôle dans la qualité d'un mortier.
- **La qualité du liant :** Un super ciment fait un retrait plus important qu'un liant dont la résistance mécanique est de 160 à 250 bars est un tort de délaisser certains liants au profit de ceux dont la haute résistance mécanique n'est pas en rapport avec les contraintes que subiront les ouvrages.
- **La fabrication du mortier :** Celui-ci doit être mélangé de façon parfaite afin d'obtenir une pâte homogène.
- **Les précautions après la mise en œuvre :** S'il s'agit de travaux effectués pendant l'été, une déshydratation trop rapide produit un retrait trop brutal et diminue la résistance du mortier, on doit alors le recouvrir et l'humidifier.

Les retraits se mesurent en laboratoire sur des prismes $4 \times 4 \times 16$ cm en mortier 1/3, munis de plots à leurs extrémités et conservés, après démoulage, dans une enceinte à 20°C et à 50 % d'humidité relative. Le mortier prend son retrait plus rapidement que la pâte pure. Le retrait sur mortier est 2 à 3 fois plus faible que celui de la pâte pure (avec le même ciment).

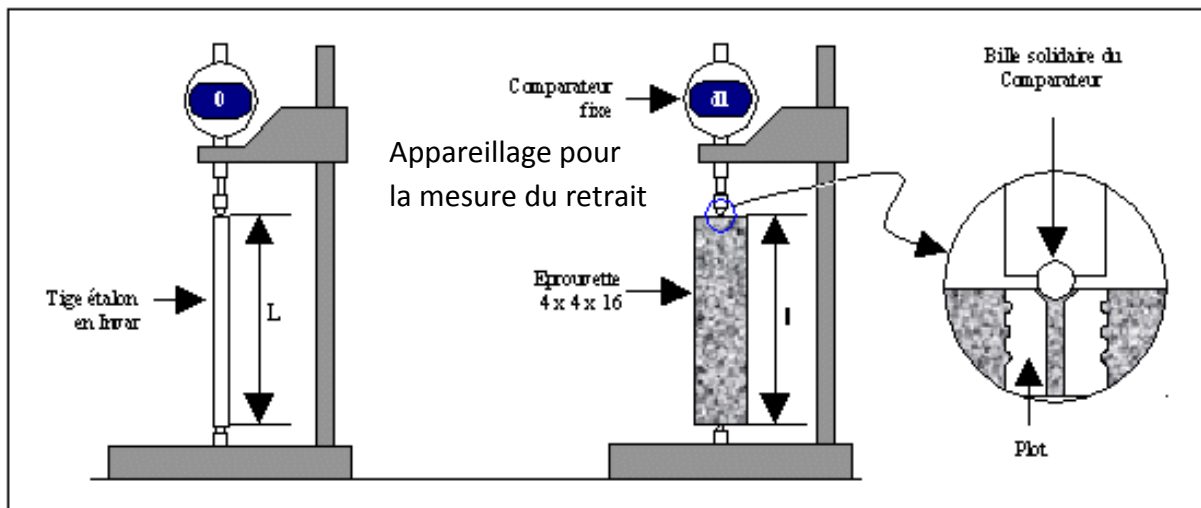


Figure. IV.6. Appareillage pour la mesure du retrait

Le gonflement des mortiers (qui se produisent lorsqu'ils sont conservés dans l'eau) se mesure sur les mêmes éprouvettes de $4 \times 4 \times 16$ cm conservées dans l'eau à 20°C . Ils sont en général assez faibles.

V. Qualité d'un bon mortier :

- Un bon mortier doit être mou, d'aspect lisse, luisant et légèrement huileux.
- Le mortier doit être utilisé immédiatement, avant tout commencement de prise. Une fois que la prise est commencée, le mortier doit être rejeté ; on ne peut jamais le re-gâcher.

- La planéité des surfaces finies ne doit pas dépasser la tolérance de 5mm sur la règle de 2m.
- Nettoyer et brosser s'il y a lieu, les surfaces d'application pour une bonne adhérence.
- Humidifier les surfaces d'application pour permettre une bonne adhérence et éviter immédiatement les retraits.

VI. Emplois des mortiers :

Le mortier permet aussi bien de réaliser des chapes, d'enduire des murs, de coller, de reboucher ou encore de sceller.

VI.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 capacité suffisante pour être étanche.

IV.2. Les enduits :

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

- Les enduits traditionnels.
- Les enduits monocouche épais.
- Les enduits isolants.

IV.3. 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. Elles doivent présenter une résistance suffisante pour assurer la transmission des charges au support, et parfois résister à l'abrasion ou au poinçonnement (sols industriels). La chape peut avoir une fonction thermique ou acoustique.

IV.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 :

- Scellement d'éléments de couverture.
- Scellements des regards de visite.
- Assemblage des éléments préfabriqués.

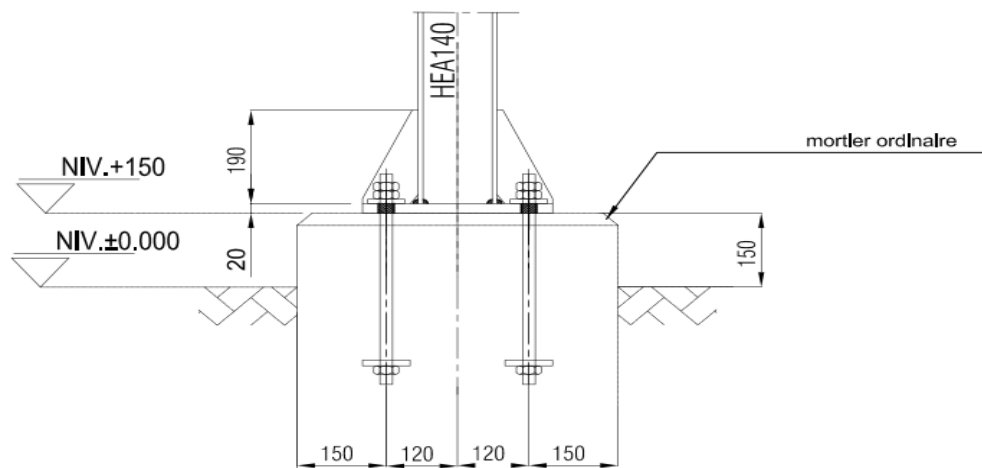


Figure. IV.5 Scellement d'un poteau en métallique en utilisant le mortier

Références Bibliographiques:

- [1] C. Lemaître, (2012) : '*Les propriétés physico-chimiques des matériaux de construction*', éditions Eyrolles.
- [2] M.A.J. M. Callaud. (2003) : '*Cours de technologie de Construction Tome III, les matériaux de construction*', Ecole inter-états des techniciens supérieurs de l'hydraulique et de l'équipement rural, version n°2.
- [3] J. Festa, G. Dreux, (1998): '*Nouveau guide du béton et de ses constituantes*', 8^{eme} éditions, Eyrolles.
- [4] Norme Algérienne, NA EN 12620 NA 5113 (2009) : '*Granulats pour béton*', Edition N°01.
- [5] H.Zhang (2011): '*Building materials in civil engineering*', woodhead publishing, ISBN 978-1-84569-955-0.
- [6] Collection technique Cim béton Les bétons (2006) : '*formulation, fabrication et mise en œuvre*', fiches techniques, tome 2.
- [7] Collection technique Cim béton (2005) : '*Les constituants des bétons et des mortiers*', fiches techniques, tome 1.