

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE
CENTRE UNIVERSITAIRE DE TISSEMSILT
INSTITUT DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES

Polycopié de:

MATERIAUX DE CONSTRUCTION 01

Licence Génie CIVIL

Réalisé par

Docteur
Toufik BOUBEKEUR

-Mai 2017-

PREFACE

Dans la présent polycopié intitulé «*Matériaux de Construction 01*», qui s'adresse aux étudiants de deuxième année *LMD* en Génie Civil. Il est rédigé de manière simplifiée et quelques exemples sont introduits après avoir donné des notions afin que l'étudiant puisse assimiler le contenu du cours et son application dans la vie courante.

Ce polycopié est divisé en quatre chapitres selon le programme de la deuxième année *LMD*. Le contenu du premier chapitre concerne une introduction générale sur les matériaux de construction, la classification et propriétés des matériaux de construction.

Le chapitre suivant est basé sur l'étude de la granularité, la classification des granulats, les caractéristiques et les différents types de granulats. Au chapitre 3ème on s'intéresse à l'étude des liants aériens (chaux aérienne) et les liants hydrauliques (les ciments portland) avec leurs constituants principaux et aussi on a abordé les différents types d'additions minérales employées en cimenterie et leurs apports techniques.

Enfin, en 4ème chapitre, on aborde la composition, les différents types de mortiers (mortier de chaux, mortier de ciment), les caractéristiques principales et leurs emplois dans les chantiers.

Tables des Matières

Chapitre 1 :

Généralités et Propriétés des matériaux de construction.

| | Page |
|---|------|
| 1.1. Définitions | 6 |
| 1.1. Classification des matériaux de construction | 6 |
| 1.2. Propriétés de matériaux | 6 |
| 1.3. Les propriétés physiques..... | 7 |
| 1.3.2. Les propriétés chimiques..... | 10 |

Chapitre 2 :

Caractéristiques des granulats,

| | |
|--|----|
| 2.1. Définitions | 12 |
| 2.2. Texture et forme des granulats | 12 |
| 2.3. Les caractéristiques physiques des granulats..... | 13 |
| 2.4. Résistance mécanique des granulats..... | 14 |

Chapitre 3 :

Les liants aériens et Les liants hydrauliques,

| | |
|---|----|
| 3.1 Introduction | 22 |
| 3.2 Liants aériens (Chaux grasse)..... | 22 |
| 3.2.1. Fabrication | 23 |
| 3.2.2. Propriétés principales..... | 26 |
| 3.2.3 Utilisation dans le bâtiment..... | 27 |
| 3.3 Liants hydraulique (ciment portland)..... | 27 |

| | |
|---|----|
| 3.3.1 Fabrication du ciment..... | 27 |
| 3.3.2. Propriétés du ciment | 31 |
| 3.3.2.1 Propriétés physiques..... | 31 |
| 3.3.2.2 Propriétés mécaniques | 34 |
| 3.3.2.3 Classification des ciments | 34 |
| 3.3.2.4 Spécifications physiques et mécaniques..... | 36 |
| 3.4 Ajouts cimentaire..... | 36 |
| 3.4.1 Avantages des ajouts cimentaires..... | 37 |
| 3.4.2 Classification des ajouts cimentaires | 37 |

Chapitre 4 :

Caractéristiques principales des mortiers,

| | |
|---|----|
| 4.1 Définition | 41 |
| 4.2 Composition | 41 |
| 4.3 Les différents types de mortiers | 42 |
| 4.4 Propriétés | 42 |
| 4.4.1. Mortier plastique..... | 42 |
| <i>a) Mesure de l'ouvrabilité du mortier.....</i> | 43 |
| 4.4.2. Mortier durci | 44 |
| <i>b) Essai de la résistance à la traction par flexion.....</i> | 45 |
| <i>c) Essai de la résistance à la compression.....</i> | 46 |
| 4.5. Emplois des mortiers | 47 |
| Référence Bibliographiques | 49 |
| Normalisation..... | 49 |

Chapitre 1 :
Généralités et Propriétés des
matériaux de construction.

1.1. Définitions

Les matériaux de construction sont considérés comme tous les matériaux utilisés pour la réalisation des ouvrages en béton armé ou en constructions métallique, ainsi qui sont largement utilisés dans le domaine de travaux publics (Route, ponts, aérodrome.....etc.).

1.1. Classification des matériaux de construction

On distingue trois types de classification les plus couramment connus :

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

- Métaux et alliages
- Polymères
- Céramiques

b) *Matériaux de base et produits* :

- Matériaux de base ou matière première (Argiles, pierres, bois, calcaire, métaux).
- Matériaux produits et composites (ciment (calcaire+argile), alliages, béton,)

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

- Les matériaux de résistance : Sont les matériaux qui ont la propriété de résister contre des sollicitations (poids propre, surcharge, séisme.....) : parmi les matériaux les plus fréquemment utilisées sont : Pierres, Terres cuites, Bois, Béton, Métaux, etc.
- Les matériaux de protection : Sont les matériaux qui ont la propriété d'enrober et de protéger les matériaux de construction principaux contre les actions extérieurs, tels que : Enduits, Peintures, Bitumes, etc.

1.2. Propriétés de matériaux

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

- Propriétés physiques: qui mesurent le comportement de matériaux à l'action de la température, l'humidité (la densité; la masse volumique, la porosité, l'absorption, la perméabilité, le retrait (le gonflement) etc..) ;

- Propriétés chimiques: qui caractérisent le comportement des matériaux dans un environnement réactif. (corrosion chimique, l'attaque de l'acide, etc...)
- Propriétés mécaniques: qui reflètent le comportement des matériaux déformés par les forces. (la résistance en compression, en traction, en flexion, torsion etc...)
- Propriétés thermiques: (la dilatation, la résistance et comportement au feu, etc...)

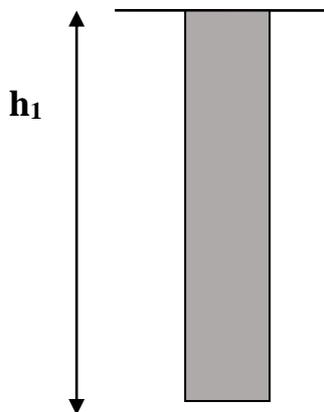
1.3. Les propriétés physiques

- La densité

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

- La masse volumique apparente

C'est la masse d'un corps par unité de volume apparent en état naturel (y compris les vides et les capillaires). Elle est exprimée en (gr/cm³; kg/m³; T/m³). On peut déterminer la masse volumique d'un matériau en utilisant la formule suivante :



$$\gamma_{ap} = \frac{M_s}{V_{ap}}$$

Ou :

M_s : masse d'un corps sèche.

V_{ap} : volume apparent.

- La masse volumique absolue

C'est la masse d'un corps par unité de volume absolu de la matière pleine (volume de matière seule sans tenir compte les vides et les pores). Elle est exprimée en (g/cm³, kg/m³ ou

T/m³). La figure 1.1 explique la méthode de détermination de la masse volumique absolue d'une matière.

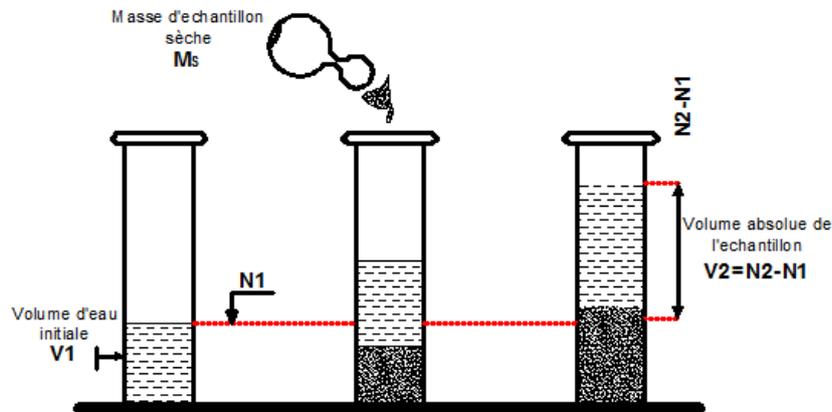


Figure 1.1 : Mesure de la masse volumique absolue.

$$\gamma_{ab} = \frac{M_s}{N_2 - N_1}$$

Exemple : Déterminer la masse volumique apparente et absolue d'un sable et d'un gravier 15/25.

Sable {

$$\gamma_{ap} = \frac{M_s}{V_{ap}} = \frac{1.54}{1} = 1.54 \text{ kg/l}$$

$$\gamma_{ab} = \frac{M_s}{N_2 - N_1} = \frac{2.55}{2 - 1} = 2.55 \text{ kg/l}$$

Gravier {

$$\gamma_{ap} = \frac{M_s}{V_{ap}} = \frac{1.41}{1} = 1.41 \text{ kg/l}$$

$$\gamma_{ab} = \frac{M_s}{N_2 - N_1} = \frac{2.58}{2 - 1} = 2.58 \text{ kg/l}$$

- Porosité et compacité

La porosité est le rapport du volume vide au volume total de la matière.

$$P = \frac{V_{vide}}{V_{total}} \times 100(\%)$$

La compacité est le rapport du volume solide au volume total de la matière.

$$c = \frac{V_{solide}}{V_{total}} \times 100(\%)$$

La porosité et la compacité sont liées par la relation suivante : $p + c = 1$

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

- L'humidité :

L'humidité est une des propriétés importante des matériaux de construction. C'est la teneur en eau réelle d'un matériau qui contient dans les pores. En général l'humidité est notée W et s'exprimée en pourcentage (%). On peut déterminer l'humidité de matériaux quelconques en utilisant la formule suivante :

$$W = \frac{G_h - G_s}{G_s} \times 100\%$$

Où

G_s : la masse sèche d'échantillon (après passage à l'étuve)

G_h : la masse humide d'échantillon.

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

- Capacité d'absorption d'eau massique « Ab »

L'absorption d'eau par immersion est la différence entre la masse d'un échantillon saturé dans l'eau et sa masse à l'état sec. L'absorption d'eau se calcul comme suit :

$$Ab = \frac{M_{sat} - M_{sec}}{M_{sec}} \times 100$$

Avec :

M_{sec} : masse sèche de l'échantillon après passage à l'étuve sous une température de 105°C.

M_{sat} : masse de l'échantillon saturé dans l'eau (Après 24 heures).

On peut déterminer le degré d'absorption par la formule suivante:

$$H_p = \frac{G_{ab} - G_s}{G_s} \%$$

Avec :

G_{ab} : la masse absorbante.

G_s : la masse sèche d'échantillon.

V_0 : le volume apparent du matériau

1.3.2. Les propriétés chimiques

Les propriétés chimiques déterminent la stabilité chimique d'un matériau qui est un pouvoir de ce matériau en service de résister à l'action chimique des acides ou à l'action des facteurs atmosphériques comme l'humidité, température,...etc.

1.3.3. Les propriétés mécaniques

Les propriétés mécaniques des matériaux sont caractérisées par la capacité de résister à toute sollicitation extérieure (compression traction, flexion, fluage.....etc.). Elle est définie par la contrainte maximale de rupture d'un matériau sous un chargement extérieur (force, poids.....). On distingue principalement :

- La résistance en compression,
- La résistance en traction (directe ou par flexion),

Chapitre 2 :

Caractéristiques des granulats,

2.1. Définitions

On appelle “**granulats**” les matériaux inertes, sables graviers ou cailloux, qui entrent dans la composition des bétons. C’est l’ensemble des grains compris entre **0** et **125** mm dont l’origine peut être naturelle, artificielle ou provenant de recyclage.

- **Les granulats naturelles:** issus de roches meubles ou massives extraites *in situ* et ne subissant aucun traitement autre que mécanique.
- **Les granulats artificiels:** qui proviennent de la transformation thermique des roches, de minerais, des sous produits industriels (laitiers, ...).
- **Les granulats recyclés:** ce sont les matériaux proviennent de la démolition des ouvrages existants en béton.

2.2. Texture et forme des granulats

La forme des granulats a une incidence sur la maniabilité des bétons, la forme la plus souhaitable se rapprochant de la sphère; une mauvaise forme (aiguilles, plats) nécessite une quantité d’eau plus élevée et peut provoquer les défauts d’aspect. (Voir la figure 2.1)



Figure 2.1: La forme des granulats.

La forme d’un granulat est définie par:

- Sa longueur **L**,
- Son épaisseur **E** qui est le plus petit écartement d’un couple de plans tangents parallèles.
- Sa grosseur **G**.

La **forme des granulats** influent sur la facilité de mise en œuvre et le compactage du béton. Ainsi la compacité du mélange, donc le volume des vides à remplir par la pâte de ciment. En plus l'**état de surface** des grains influent sur la compacité du mélange et l'adhérence du granulat à la pâte de ciment.

2.3. Les caractéristiques physiques des granulats

On peut les classer en deux groupes:

- Celles qui concernent le granulat lui-même;
- Celles qui concernent la teneur en substances étrangères et nocives.

✓ Premier groupe:

- La masse volumique apparente.
- La porosité.
- L'absorption des granulats.

✓ Deuxième groupe: (propreté)

Pour les sables, la propreté est contrôlée par l'essai dit "**Equivalent de sable**" (E.S.) (NF P 18-598). On agite une certaine quantité de sable dans une solution lavante (cette solution contient 111 g de chlorure de calcium anhydre, 480 g de glycérine et 12 g de formaldéhyde pour 40 litres d'eau). On détermine la propreté d'un sable en utilisant la méthode présentée sur la figure 2.2.

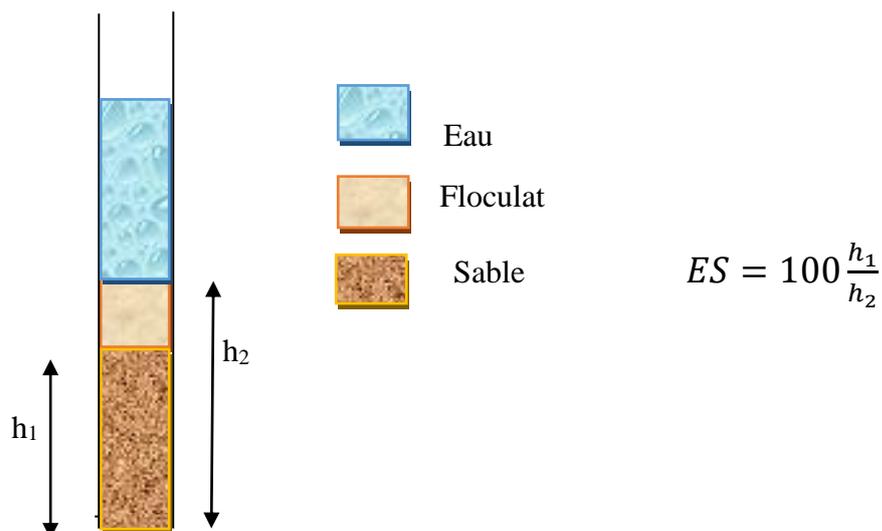


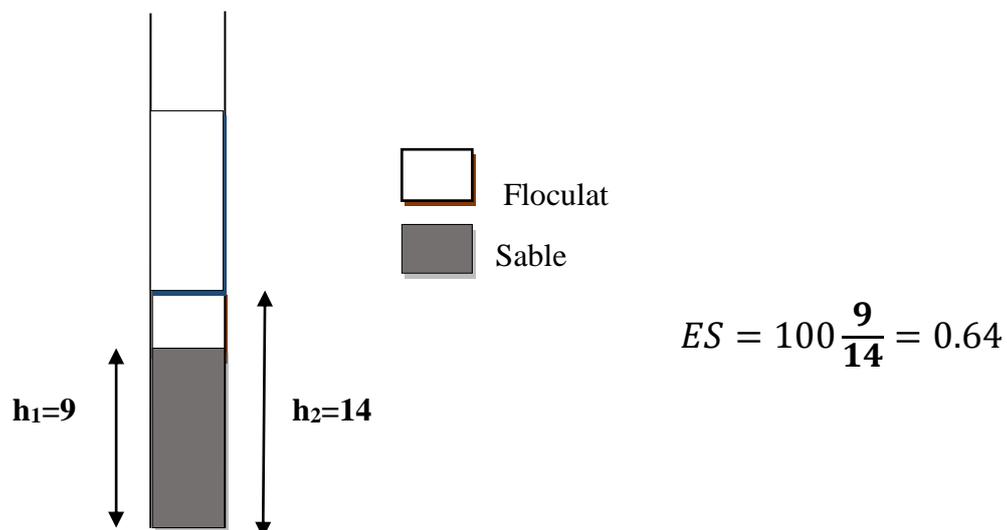
Figure 2.2 : Méthode de mesure de la propreté du sable.

Les Valeurs préconisées par la norme (NF P 18-598) pour déterminer la nature et la qualité du sable sont illustrées dans le tableau 2.1.

Tableau 2.1: Valeurs préconisées pour l'équivalent de sable.

| Equivalent du sable (ES) | Nature | Qualité du sable |
|--------------------------|---------------------------|--|
| $ES < 60$ | Sable argileux | Risque de retrait ou de gonflement, à rejeter pour des bétons de qualité |
| $60 \leq ES < 70$ | Sable légèrement argileux | De propreté admissible pour le béton de qualité |
| $70 \leq ES < 80$ | Sable propre | Convenant parfaitement pour les bétons de qualité |
| $ES > 80$ | Sable très propre | Risque d'entraîner un défaut de plasticité |

Exemple :



Interprétation des résultats : Sable légèrement argileux; admissible pour les bétons de qualité courante.

2.4. Résistance mécanique des granulats

a) L'essai-Deval

L'essai Deval a pour but de mesurer la résistance à l'attrition d'un matériau. L'attrition est reproduite dans l'essai par une combinaison de frottements réciproques et de chocs modérés. L'essai s'effectue sur tous les granulats de classe granulaire 25-50 mm, d'origine

naturelle ou artificielle utilisés pour le ballast des voies ferrées. Il existe deux types d'essai : à sec ou humide. L'essai s'applique à tous les matériaux, quelle que soit la nature minéralogique, et fournit une évaluation à l'aptitude du matériau à se transformer dans la chaussée sous l'action mécanique des véhicules.

La résistance à l'attrition par frottements réciproques et chocs modérés du matériau s'exprime par un coefficient dit "coefficient Deval". Ce coefficient est égal par définition, à :

$$CD = \frac{2800}{P}$$

Où

p : poids en grammes des éléments inférieurs à 1,6 mm créés dans la machine Deval.

- Si l'essai est effectué à sec, le coefficient obtenu sera appelé "coefficient Deval sec".
 - Si l'essai est effectué en présence d'eau, il sera appelé "coefficient Deval humide".
- L'essai donne également des indications sur la fragilité du matériau.

b) L'essai micro-Deval

L'essai micro- Deval permet de déterminer la résistance à l'usure par frottements réciproques des éléments d'un granulats. Le matériau évolue pendant l'essai par frottement des éléments les uns sur les autres, sur le cylindre de la machine en rotation et sur les boulets (charge abrasive) à sec ou en présence d'eau. La granularité du matériau soumis à l'essai est choisie parmi les classes granulaires : 4-6.3mm; 6.3-10 mm; 10-14 mm; 25-50 mm. Pour les essais effectués sur les gravillons entre 4 et 14 mm, une charge abrasive est utilisée.

La résistance à l'usure s'exprime par le coefficient Micro-Deval qui s'écrit :

$$CMD = \frac{m}{M} \times 100(\%)$$

Ou

M : la masse du matériau soumis à l'essai.

m : la masse des éléments inférieurs à 1,6 mm produits au cours de l'essai.

c) L'essai Los Angeles

L'essai (N.F. P18.573) permet de mesurer les résistances combinées à la fragmentation par chocs et à l'usure par frottements réciproques des éléments d'un granulat. Il s'applique aux granulats utilisés pour la constitution des assises de chaussée, y compris les couches de roulement. Le matériau évolue pendant l'essai, d'une part par suite du choc des boulets sur le granulat (rupture fragile des éléments), d'autre part par frottement des éléments les uns sur les autres, sur le cylindre de la machine et sur les boulets.

$$LA = \frac{m}{5000} \times 100(\%)$$

m : la masse des éléments inférieurs à 1,6 mm produits au cours de l'essai.

NB : Pour un bon béton une valeur max de LA=30 est demandée.

d) Analyse granulométrique

L'analyse granulométrique permet de déterminer la grosseur et les pourcentages pondéraux respectifs des différentes familles de grains constituant l'échantillon.

L'essai de l'analyse granulométrique consiste à fractionner le matériau en plusieurs classes granulaires au moyen d'une série de tamis. Les tamis ayant des mailles carrées dont la dimension intérieure est exprimée en millimètres s'étalant entre 0.063 mm et 125mm suivant une progression géométrique de raison $\sqrt[10]{10} \approx 1.259$ qui sont les suivants :

0.063 – 0.08 - 0.10 - 0.125 - 0.16 - 0.2 - 0.25 - 0.315 - 0.4 - 0.5 - 0.63 - 0.8 – 1 - 1.25 - 1.6 – 2 - 2.5 - 3.15 – 4 – 5 - 6.3 – 8 – 10 - 12.5 – 14 – 16 – 20 – 25 - 31.5 – 40 – 50 – 63 – 80 – 100 – 125.

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

En déduire ensuite les refus et les tamisats cumulés en poids (gramme) et en pourcentage comme le montre le tableau (tableau 2.2).

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

Tableau 2.2 : Résultats de l'analyse granulométrique

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

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

Les courbes granulométriques des différents types des granulats sont représentées sur la figure 2.3 (en abscisse les dimensions des mailles sur une échelle logarithmique, et en ordonnée les pourcentages des refus ou des tamisats cumulés sur une échelle arithmétique).

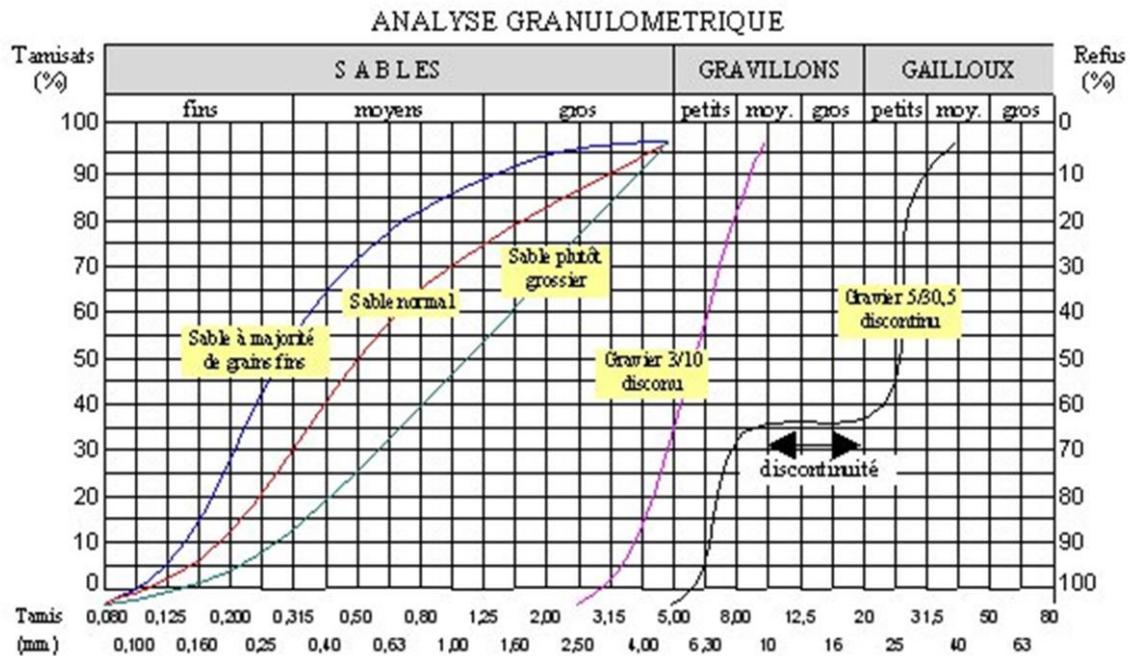


Figure 2.3: Les courbes granulométriques des différents types des granulats

- **Module de finesse**

Le module de finesse est un coefficient permettant de caractériser l'importance des éléments fins dans un granulat. Le module de finesse est d'autant plus petit que le granulat est riche en éléments fins.

Le module de finesse d'un sable est égal au 1/100 de la somme des refus cumulés, exprimée en pourcentages sur les tamis de la série suivante : 0.16 – 0.315 – 0.63 – 1.25 – 2.5 et 5 mm.

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

Sable un peu trop fin : MF varie de **1.80** à **2.20** (recherche de facilité de mise en œuvre au détriment probable de la résistance),

Sable préférentiel : MF varie de **2.20** à **2.80** (ouvrabilité satisfaisante et une bonne résistance avec des risques de ségrégation limités),

Sable un peu trop grossier : MF varie de **2.80** à **3.20** (recherche de résistance élevée mais on aura, en général, une faible ouvrabilité et des risques de ségrégation).

- **Correction du module de finesse du sable**

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

On pourra utiliser la règle d'Abrams :

- Un sable grossier S_1 de module de finesse MF_1
- Un sable fin S_2 de module de finesse MF_2
- Le sable de mélange S de module de finesse souhaité MF

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

- Proportion du sable $S_1 = \frac{MF - MF_2}{MF_1 - MF_2}$
- Proportion du sable $S_2 = \frac{MF_1 - MF}{MF_1 - MF_2}$

Les résultats d'une analyse granulométrique peuvent être présentés selon **l'exemple** suivant :

Tableau 2.2 : Résultats de l'analyse granulométrique

| Maille des Tamis (mm) (en ordre décroissant) | Masse du refus partiel (g) | Masse du refus cumulé (g) | Refus cumulé en Pourcentage (%) | Tamisât cumulé en Pourcentage (%) |
|--|----------------------------|---------------------------|---------------------------------|-----------------------------------|
| 5 | 41 | 41 | 2.05 | 97.95 |
| 2.5 | 162 | 203 | 10.15 | 89.85 |
| 1.25 | 494 | 697 | 34.87 | 65.13 |
| 0.63 | 705 | 1402 | 70.14 | 29.86 |
| 0.315 | 396 | 1798 | 89.95 | 10.05 |
| 0.160 | 159 | 1957 | 97.90 | 2.10 |
| 0.08 | 25 | 1982 | 99.15 | 0.85 |
| fillers | 17 | 1999 | 100 | 0.00 |

La courbe granulométrique du sable étudié est représentée sur la figure 2.3 (en abscisse les dimensions des mailles sur une échelle logarithmique, et en ordonnée les pourcentages des refus ou des tamisât cumulés sur une échelle arithmétique).

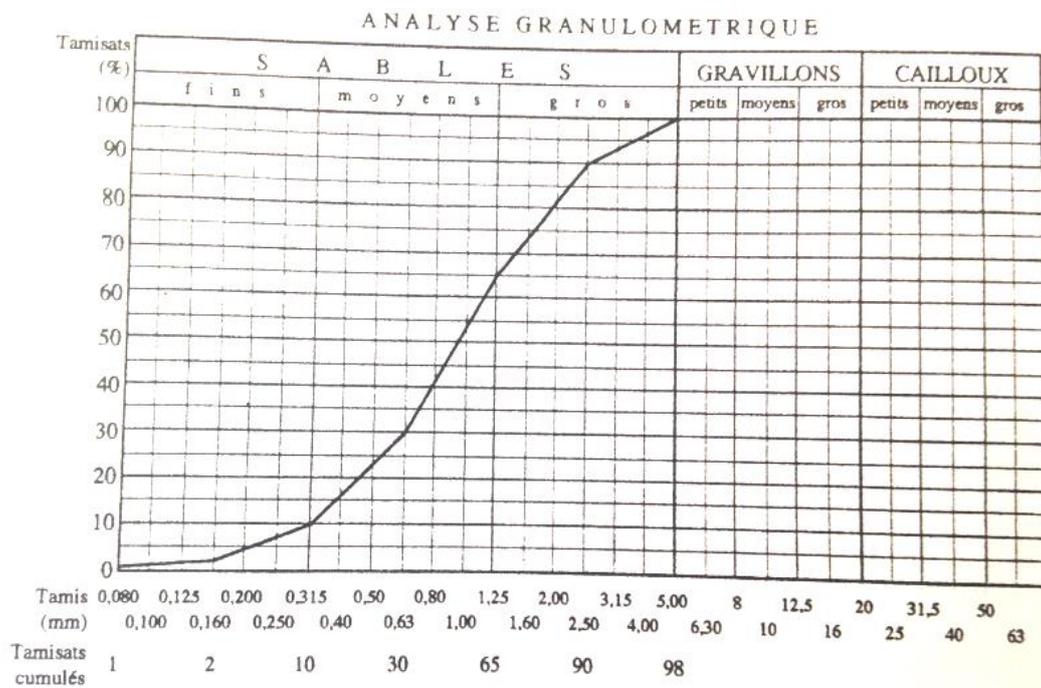


Figure 2.3 : Courbe granulométrique du sable étudié.

Module de finesse :

$$MF = \frac{1}{100} \sum (98 + 90 + 70 + 35 + 10 + 2) = 3.05$$

Sable un peu trop grossier : MF varie de **2.80** à **3.20** (résistance élevée mais on aura, une faible ouvrabilité et des risques de ségrégation).

Chapitre 3 :

**Les liants aériens et Les liants
hydrauliques**

3.1 Introduction

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

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

3.2 Liants aériens (Chaux grasse)

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



Figure 3.1: Chaux aérienne.

3.2.1. Fabrication

a) Extraction

Le calcaire est extrait des carrières. Traditionnellement, l'extraction se faisait par des moyens manuels (pics, pioches,...) comme le montre la figure 3.2. On a recours actuellement à l'utilisation d'explosifs (tirs de mine) pour faciliter l'extraction de la roche. Les blocs ainsi obtenus sont de la roche, charriés par des pelles mécaniques et déposés dans des camions chargeurs. Ils sont acheminés vers les ateliers de préparation, où débute leur transformation (concassage, criblage et calibrage).



Figure 3.2: Extraction de la matière première.

b) Concassage, criblage et calibrage

La première opération consiste à concasser, puis cribler les blocs, de façon à acquérir un calibre de pierre compatible avec le type de four utilisé. Les fours verticaux requièrent une fourchette de calibre de 20 à 140 mm, contre 5 à 40 mm pour les fours rotatifs.

c) Cuisson ou calcination

Deux types de fours sont employés dans l'industrie pour la cuisson du calcaire.

- Four vertical ou four droit, sur le modèle des fours primitifs, se présente généralement sous la forme d'un cylindre en acier (dim. Moy. : diam. 2m et H. 8m), chemisé intérieurement avec un matériau réfractaire, résistant à l'abrasion et à la corrosion (Voir la figure 3.3). Il comporte des ventilateurs de tirage. La partie inférieure est munie d'une

grille de défournement. Les perfectionnements de ces dernières années ont contribué à faire du four droit annulaire le plus économique d'un point de vue énergétique.



Figure 3.3: Four vertical ou four droit.

- Le four rotatif possède les caractéristiques de ceux utilisés dans l'industrie cimentière (voir la figure 3.4). Pour fabriquer de la chaux, il cuit le matériau entre 1000°C et 1300°C, suivant le type de chaux produite. Le calcaire est introduit par l'un des côtés. Il traverse une zone de préchauffage avant de subir la calcination. La chaux est refroidie avant d'être extraite. La pierre descend lentement en traversant d'abord une zone de préchauffage. Cette opération importante permet l'évaporation de l'eau libre contenue dans la pierre et évite l'éclatement des blocs, Puis la pierre traverse une seconde zone où elle subit la calcination. C'est une décarbonatation qui a pour effet d'entraîner la perte de "CO₂" à partir de 900°C. Dans les dolomies, la décarbonatation se fait à une température inférieure ou égale à 400°C pour donner de la magnésie (MgO). Les vapeurs d'eau produites sont évacuées avec les fumées et participent à la bonne décarbonatation du calcaire. La chaux vive ainsi produite continue sa descente vers une troisième zone de refroidissement, avant d'être extraite. L'arrivée d'air frais au bas du four provoque un

courant d'air qui parcourt le four en sens inverse et intervient dans les différentes étapes de fabrication de la chaux : refroidissement, combustion du combustible,...etc.



Figure 3.4: Four rotatif pour la fabriquer de la chaux.

d) Extinction

C'est l'opération qui permet le passage de la chaux vive à a chaux éteinte; elle s'accompagne d'une augmentation de volume : le foisonnement. Elle résulte d'un changement de structure moléculaire et de la formation d'aiguilles d'hydrate de chaux. Au moment de son utilisation, la chaux doit être entièrement hydratée, sous peine de voir des gonflements destructeurs se manifester dans les ouvrages. L'extinction est obtenue par adjonction d'eau et peut s'effectuer selon diverses méthodes :

- Méthode de l'extinction spontanée : est obtenue en soumettant la chaux vive à l'action lente et continue de l'air. L'humidité présente dans l'atmosphère assure le rôle de l'eau d'extinction.
- La méthode par arrosage manuel : consiste à apporter la juste quantité d'eau nécessaire à l'extinction (10 à 15%). La réaction est exothermique (dégagement de chaleur) et engendre des projections dans le cas de blocs de chaux.
- La méthode traditionnelle par immersion : comporte le trempage de blocs dans l'eau, puis l'égouttage et enfin le stockage pour laisser se poursuivre l'extinction. Cette opération est exothermique (15500 cal/mol.g; $T= 150\text{ }^{\circ}\text{c}$). L'incorporation de la chaux doit se faire avec précaution, car la réaction peut entraîner des projections et des bouillonnements.

- L'extinction par fusion, dite extinction ordinaire : consiste à mettre la quantité d'eau utile, pour obtenir une bouillie épaisse (chaux en pâte). Cette méthode implique une bonne maîtrise de la quantité d'eau car il faut éviter de brûler (formation de grumeaux) ou de noyer (mauvaise consistance) la chaux. Les granulats de chaux vive sont broyés et passent par un hydrateur. L'eau introduite (7 à 10%) permet l'hydratation de la chaux vive, mais elle aide également à l'évacuation de la chaleur dégagée lors de la réaction ($T = 150\text{ °C}$). Les particules qui n'ont pas réagi appelés 'grappiers' (impuretés, surcuits, incuits,...) sont éliminées par tamisage. La chaux éteinte pulvérulente est tamisée, conditionnée en sac de 25 ou 50kg ou en vrac.

3.2.2. Propriétés principales

a) Physiques

- Le refus au tamis de 800μ est nul et le refus au tamis de 80μ doit être inférieur à 10%.
- La finesse globale doit se situer dans l'intervalle de 8.000 à 20.000 cm^2/g .
- La masse volumique apparente varie de 500 à 700 kg/m^3 et la masse volumique absolue varie de 2200 à 2500 kg/m^3 .
- La chaux vive est très avide d'eau, elle s'éteint en s'hydratant avec un fort dégagement de chaleur (absorbe pour 1kg de chaux, 3 litres d'eau). Cette propriété est utilisée pour assécher et traiter les sols très imprégnés d'eau.
- La résistance réfractaire de la chaux aérienne varie entre 1800 à 2000 $^{\circ}\text{C}$.
- La chaux aérienne prend lentement. Le temps de début de prise est de 600 minutes (10 heures).
- Les chaux aériennes trouvent leurs applications dans le bâtiment dans la préparation de mortiers et de badigeons.

b) Chimiques :

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

3.2.3 Utilisation dans le bâtiment

- Enduits :

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

- Mortiers de pose et de jointement :

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

3.3 Liants hydraulique (ciment portland)

Les Romains et les Grecs savaient déjà fabriquer du liant hydraulique en faisant réagir la chaux éteinte et des cendres volcaniques. La recherche sur l'hydraulicité des chaux a commencé à la fin du 18e siècle, pour aboutir vers 1840 à la fabrication des ciments modernes. Le Français Louis Vicat découvre en 1817 le principe d'hydraulicité des chaux - concernant la proportion d'argile et la température de cuisson- et publie ses travaux sans prendre de brevet. En 1840, Louis Vicat découvre les principes d'hydraulicité des ciments Portland, par une cuisson à une température de 1450°C qui permet d'obtenir le clinker.

3.3.1 Fabrication du ciment

Le ciment Portland est une poudre minérale dont la propriété est de durcir sous l'eau, formant une pâte qui durcit suivant une réaction et un processus d'hydratation.

La fabrication de ciment passe par les opérations suivantes:

- Extraction et concassage,
- Préparation du cru,
- Cuisson ou calcination,

- Broyage,
- Expéditions.

Le constituant principal du ciment est le clinker, obtenu à partir de la cuisson d'un mélange approprié de 80 % de calcaire et 20% d'argile. La figure 3.5 montre les étapes de fabrication du ciment portland.

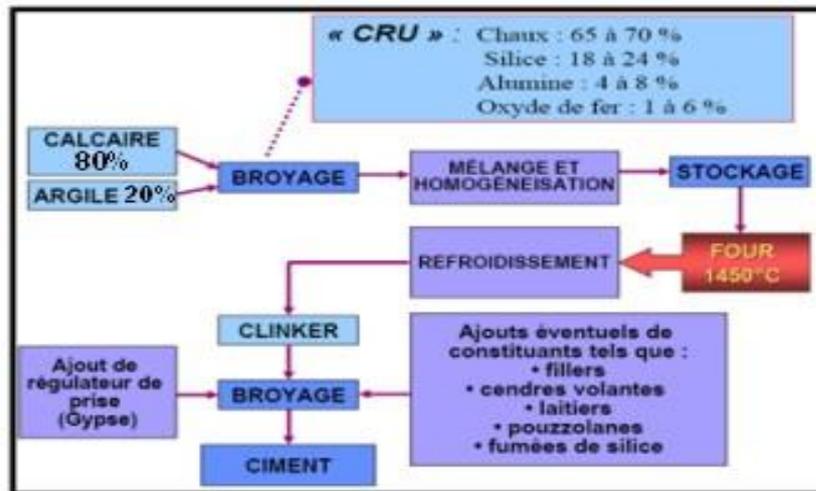


Figure 3.5: Etapes de fabrication du ciment portland.

- Extraction et concassage

Cette étape consiste à extraire les matières premières (calcaire et argile), à partir de carrières naturelles à ciel ouvert (figure 3.6). Ces matières premières sont extraites des parois rocheuses par abattage à l'explosif ou à la pelle mécanique. Les blocs de roches obtenus sont transportés et broyés en éléments de dimensions maximales de 50 mm. Les matières premières sont échantillonnées, dosées et mélangées de façon à obtenir une composition régulière dans le temps. La prise d'échantillons en continu permet de déterminer la quantité des différents ajouts nécessaires (oxyde de fer, alumine et silice).

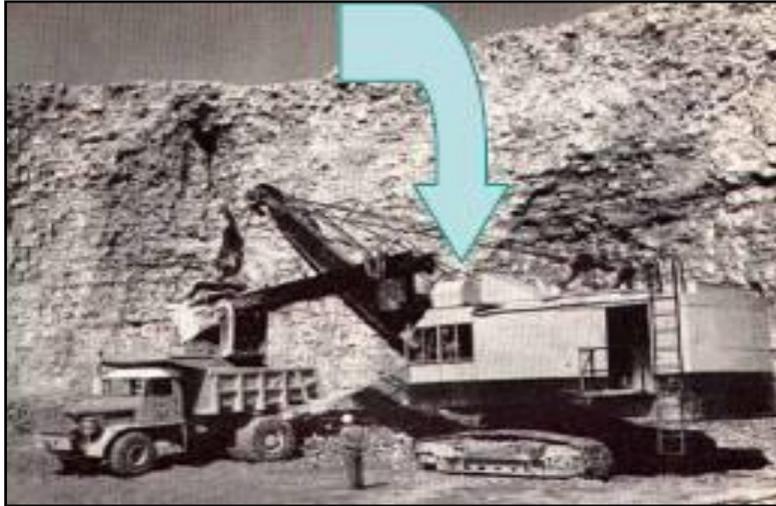


Figure 3.6: Extraction de la matière première

- Préparation de cru

Les grains de calcaire et d'argile sont infiniment mélangés par broyage et délayage, dans les proportions définies, en un mélange très fin appelé "cru". Des corrections de composition peuvent être effectuées en incorporant des ajouts en faible proportion comme l'oxyde de fer. Le cru est préparé automatiquement sous forme de poudre (pré-homogénéisation). La pré-homogénéisation permet d'atteindre un dosage parfait des deux constituants essentiels du ciment par superposition de multiples couches. Cette poudre de cru, est une nouvelle fois homogénéisée par fluidisation, corrigée si nécessaire puis stockée en silo avant l'introduction au four (figure. 3.7).

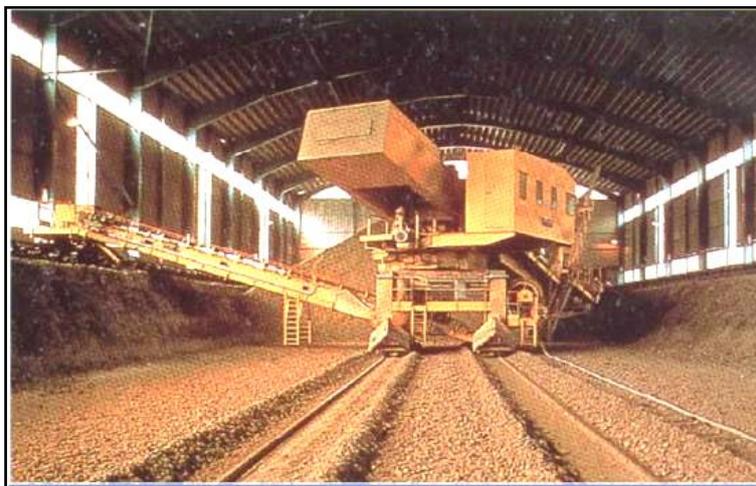


Figure 3.7 : Méthode de préparation du cru.

- Cuisson ou calcination

Les installations de cuisson sont similaires et comportent deux parties : un échangeur de chaleur, comportant 4 à 5 cyclones dans lesquels la poudre déversée à la partie supérieure progresse jusqu'à l'entrée du four, qui se réchauffe au contact des gaz chauds sortant de ce four et se décarbonate en partie. La deuxième partie est la cuisson dans un four cylindrique ayant 60 à 150 mètres de long et de 4 à 5 mètres de diamètre, légèrement incliné et tournant à environ 1 tour/mn (figure 3.8). Le cru pénètre à l'amont du four où s'achève la décarbonatation et progresse jusqu'à la zone de clinkérisation (1450 °C). 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.



Figure 3.8: Le four cylindrique rotatif

- Broyage

Le clinker obtenu est véhiculé vers les trémies des broyeurs où il est finement broyé et mélangé avec 3 à 5% de gypse, qui sert de régulateur de prise. Dans certains cas, on ajoute d'autres constituants tels que le laitier, la pouzzolane, les cendres volantes et les fillers calcaires pour l'obtention de divers types de ciment. Les compositions chimiques du clinker sont mentionnées dans le tableau 3.1.

Tableau 3.1 : Composition chimique de clinker

| Eléments | 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 | 0 - 1,5 |

- Les expéditions

Les grains de ciment sont récupérés à la sortie du broyeur et expédiés vers des silos de stockage. Ces silos sont de forme cylindriques et de capacité pouvant aller jusqu'à 10.000 tonnes (figure 3.9).



Figure 3.9 : Les modes d'expédition du ciment

3.3.2. Propriétés du ciment

3.3.2.1 Propriétés physiques

- Finesse de mouture : L'hydratation du ciment commence sur la surface des grains, donc c'est la superficie totale des grains qui représente le matériau disponible pour l'hydratation. La vitesse d'hydratation dépend donc de la finesse des grains de ciment. Pour avoir une hydratation rapide et une résistance élevée à court terme, une finesse importante du ciment est exigée. La méthode utilisée pour mesurer la surface spécifique du ciment est la méthode de Blaine (figure.3.10).

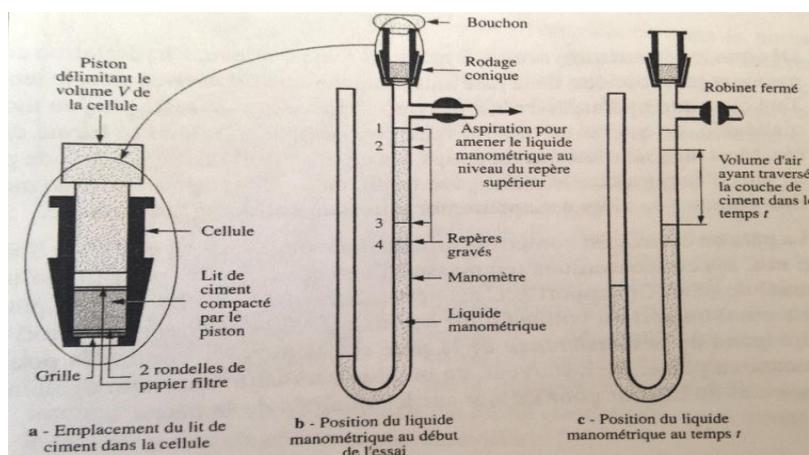


Figure 3.10 : Mesurer de la surface spécifique du ciment par l'appareil de Blaine.

- La consistance : La consistance est le pourcentage optimal d'eau qui permet d'obtenir une pâte de ciment de consistance normale. On utilise généralement l'appareil de "Vicât" pour mesurer cette consistance et selon la norme NF EN 196-3. La figure 3.11 présente une photo de l'appareil de mesure de la consistance normale.

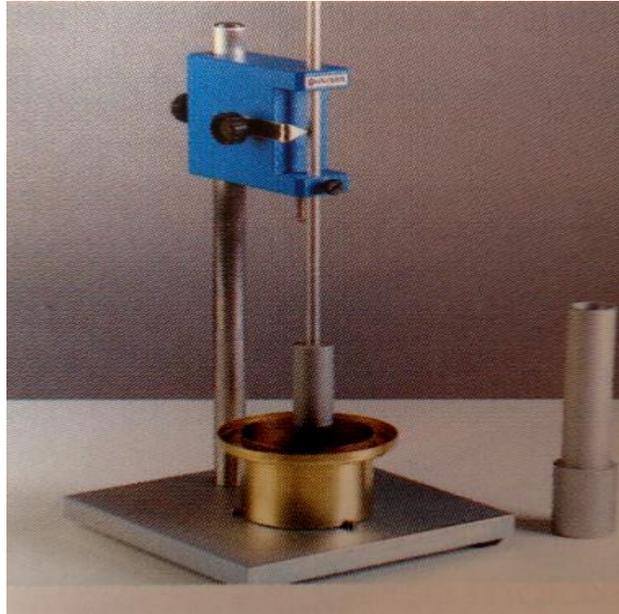


Figure 3.11 : Mesurer de la surface spécifique du ciment par l'appareil de Blaine

- La prise : C'est le terme employé pour décrire le raidissement de la pâte de ciment. La prise est définie comme étant le changement d'un état fluide à un état solide. Le début de prise correspond à l'augmentation brusque de la viscosité de la pâte de ciment et à une élévation de sa température. La fin de prise correspond à la transformation régulière et progressive de la pâte de ciment en un bloc rigide. Pour mesurer le temps de début et de fin de prise, on utilise généralement l'essai de "Vicât", NF EN 196-3. La figure 3.12 illustre l'appareil et résume la méthode de détermination du temps de prise.

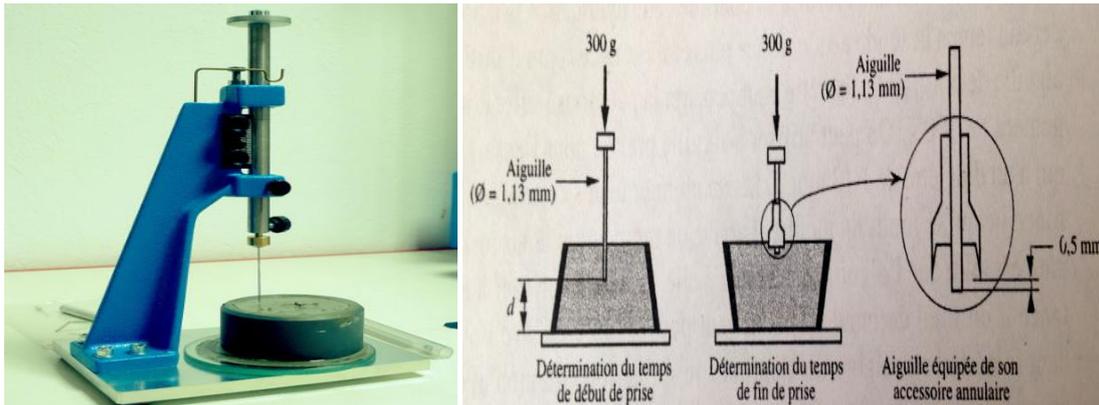
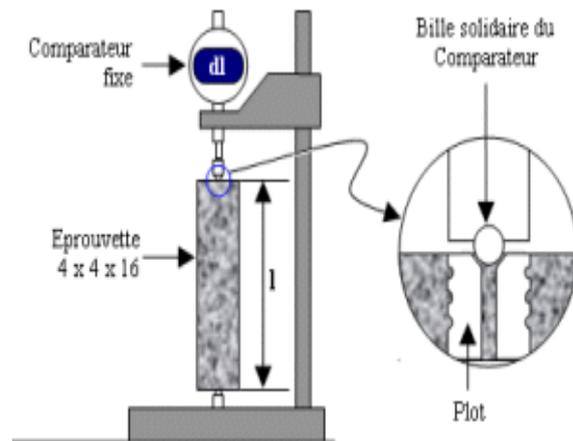


Figure 3.12 : Mesurer du temps de prise du ciment par l'appareil de Vicat

- **Retrait** : Le retrait est la diminution du volume apparent de la matière ; il est mesuré sur des éprouvettes 4×4×16cm, conservées à l'air de température $T = 20$ °C et d'humidité relative.



- **Expansion** : Les volumes des pâtes de ciment, les mortiers et les bétons gonflent en présence d'humidité ou d'eau. Les principales causes de l'expansion sont : - excès de gypse, - excès de la chaux libre CaO. - excès de magnésium libre MgO. L'expansion est mesurée selon NF EN 196-3, on utilise le même appareil que celui de retrait.

3.3.2.2 Propriétés mécaniques

Les résistances mécaniques, en traction et en compression des ciments, sont déterminées sur des éprouvettes 4x4x16 cm en mortier normal à 28 jours d'âge. La résistance du mortier est alors considérée comme significative de la résistance du ciment. Les figures 3.9 (a) et (b) montrent l'évolution des résistances des différents produits d'hydratation du ciment.

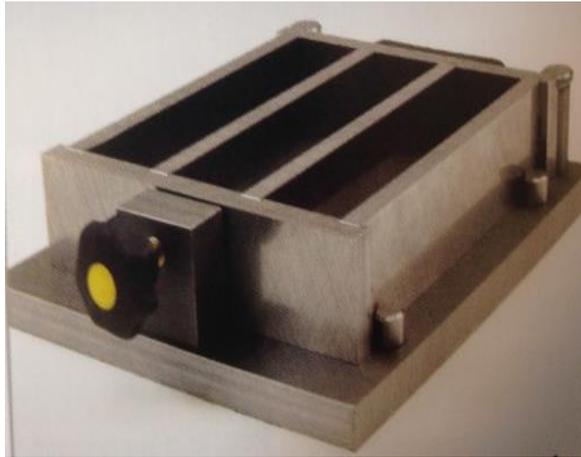


Figure. 3.13 (a): moule prismatique 4x4x16 pour essais de compression

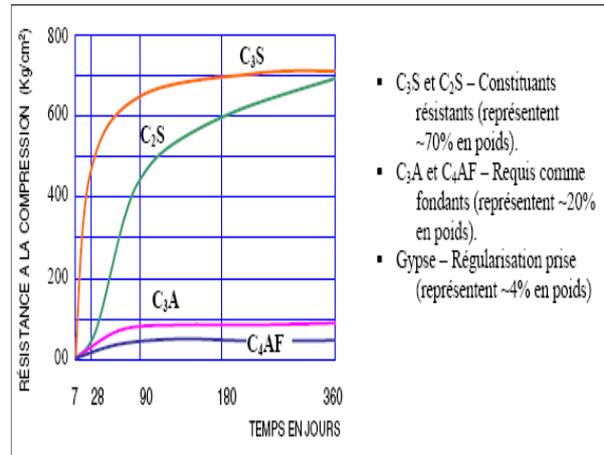


Figure. 3.13 (b): L'évolution des résistances des différents produits d'hydratation du ciment.

3.3.2.3 Classification des ciments

Les normes NA 442 et EN 197-1 définie cinq types de ciments. Ils sont classés en fonction de leur composition :

- CEM I : Ciment Portland artificiel,
- CEM II : Ciment portland composé,
- CEM III : Ciment de haut fourneau,
- CEM IV : Ciment pouzzolanique,
- CEM V : Ciment au laitier et aux cendres.

La composition des ciments est définie dans le tableau 3.2.

Tableau 3.2 : Types de ciments et leur composition.

| Principaux types | Notation des 27 produits (types de ciment courant) | | Composition (pourcentage en masse) | | | | | | | | | | Constituants secondaires | |
|------------------|--|-------------|------------------------------------|--------------------------|-----------------|-------------|-------|------------------|-------|-----------------|----------|-------|--------------------------|-----|
| | | | Constituants principaux | | | | | | | | | | | |
| | | | Clinker | Laitier de haut fourneau | Fumée de silice | Pouzzolanes | | Cendres volantes | | Schiste calciné | Calcaire | | | |
| K | S | D | Naturelle P | Naturelle calcinée Q | Silicieuse V | Calciqne W | T | L | LL | | | | | |
| CEM I | Ciment Portland | CEM I | 95-100 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | 0-5 |
| | Ciment Portland au laitier | CEM II/A-S | 80-94 | 6-20 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | 0-5 |
| | | CEM II/B-S | 65-79 | 21-35 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | 0-5 |
| | Ciment Portland à la fumée de silice | CEM II/A-D | 90-94 | — | 6-10 | — | — | — | — | — | — | — | — | 0-5 |
| | Ciment Portland à la pouzzolane | CEM II/A-P | 80-94 | — | — | 6-20 | — | — | — | — | — | — | — | 0-5 |
| | | CEM II/B-P | 65-79 | — | — | 21-35 | — | — | — | — | — | — | — | 0-5 |
| | | CEM II/A-Q | 80-94 | — | — | — | 6-20 | — | — | — | — | — | — | 0-5 |
| | | CEM II/B-Q | 65-79 | — | — | — | 21-35 | — | — | — | — | — | — | 0-5 |
| CEM II | Ciment Portland aux cendres volantes | CEM II/A-V | 80-94 | — | — | — | — | 6-20 | — | — | — | — | — | 0-5 |
| | | CEM II/B-V | 65-79 | — | — | — | — | 21-35 | — | — | — | — | — | 0-5 |
| | | CEM II/A-W | 80-94 | — | — | — | — | — | 6-20 | — | — | — | — | 0-5 |
| | | CEM II/B-W | 65-79 | — | — | — | — | — | 21-35 | — | — | — | — | 0-5 |
| | Ciment Portland au schiste calciné | CEM II/A-T | 80-94 | — | — | — | — | — | — | 6-20 | — | — | — | 0-5 |
| | | CEM II/B-T | 65-79 | — | — | — | — | — | — | 21-35 | — | — | — | 0-5 |
| | Ciment Portland au calcaire | CEM II/A-L | 80-94 | — | — | — | — | — | — | — | — | 6-20 | — | 0-5 |
| | | CEM II/B-L | 65-79 | — | — | — | — | — | — | — | — | 21-35 | — | 0-5 |
| | | CEM II/A-LL | 80-94 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | 6-20 | 0-5 |
| | | CEM II/B-LL | 65-79 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | 21-35 | 0-5 |
| | Ciment Portland composé | CEM II/A-M | 80-94 | ← 6-20 → | | | | | | | | | 0-5 | |
| | | CEM II/B-M | 65-79 | ← 21-35 → | | | | | | | | | 0-5 | |
| CEM III | Ciment de haut fourneau | CEM III/A | 35-64 | 36-65 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | 0-5 |
| | | CEM III/B | 20-34 | 66-80 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | 0-5 |
| | | CEM III/C | 5-19 | 81-95 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | 0-5 |
| CEM IV | Ciment pouzzolanique ^{c)} | CEM IV/A | 65-89 | — | ← 11-35 → | | | | | — | — | — | 0-5 | |
| | | CEM IV/B | 45-64 | — | ← 36-55 → | | | | | — | — | — | 0-5 | |
| CEM V | Ciment composé ^{c)} | CEM V/A | 40-64 | 18-30 | — | ← 18-30 → | | | — | — | — | — | 0-5 | |
| | | CEM V/B | 20-38 | 31-50 | — | ← 31-50 → | | | — | — | — | — | 0-5 | |

3.3.2.4 Spécifications physiques et mécaniques.

- Trois classes de résistance normale sont couvertes: 32,5, 42,5 et 52,5
- Pour chaque classe de résistance normale, une sous-classe de résistance aux jeunes âges est définie (R).
- Pour tous les types de ciments, la résistance à la compression, déterminée selon EN196- 1 doit satisfaire aux spécifications du tableau 3.3.

Tableau 3.3 : Spécification physiques et mécaniques des ciments selon EN 197–1

| Classe de résistance | Résistance à la compression MPa | | | | Temps de début de prise min | Stabilité (expansion) mm |
|----------------------|---------------------------------|---------|---------------------|--------|-----------------------------|--------------------------|
| | Résistance à court terme | | Résistance courante | | | |
| | 2 jours | 7 jours | 28 jours | | | |
| 32,5 N | --- | = 16,0 | ≥ 32,5 | ≤ 52,5 | ≥ 75 | ≥ 10 |
| 32,5 R | >= 10,0 | --- | | | | |
| 42,5 N | >= 10,1 | --- | ≥ 42,5 | ≤ 62,5 | ≥ 60 | |
| 42,5 R | >= 20,0 | --- | | | | |
| 52,5 N | >= 20,1 | --- | ≥ 52,5 | --- | ≥ 45 | |
| 52,5 R | >= 30,0 | --- | | | | |

3.4 Ajouts cimentaire

Les ajouts cimentaires sont des matériaux présentant une granulométrie très fine que l'on incorpore le plus souvent au ciment, quelquefois également au béton. Les ajouts permettent soit d'améliorer les caractéristiques du béton ou de lui conférer des propriétés spécifiques. Les ajouts sont souvent meilleur marché que le ciment Portland et permettent d'obtenir un ciment composé plus économique (voir la figure 3.14).



Figure 3.14 : Ajouts cimentaire.

3.4.1 Avantages des ajouts cimentaires

- **Avantages fonctionnels**

- Amélioration de la maniabilité et la réduction de la demande en eau;
- Diminution de la chaleur d'hydratation dégagée du béton;
- Amélioration des propriétés mécaniques et de la durabilité du béton;

- **Avantages économiques**

- Le coût des ajouts minéraux des sous produits industriels est souvent égal au coût du transport et de la manipulation;
- Réduction de la consommation d'énergie, ce qui réduit le prix du ciment.

- **Avantages écologiques**

- Diminution de l'émission du CO₂ dégagée par l'industrie cimentaire.
- Elimination des sous produits de la nature.

3.4.2 Classification des ajouts cimentaires

Selon la norme **ENV 206**, il existe deux types d'addition:

a. Les additions de type I: Ce sont des matériaux quasiment inertes, organiques naturelles ou synthétiques spécialement sélectionnées qui, par **leur composition granulométrique**, améliorent **les propriétés physiques** du ciment portland (ouvrabilité, pouvoir de rétention d'eau...). Parmi ces additifs on distingue le calcaire, la poussière et les fillers :

- *Fillers* : les fillers sont des produits obtenus par broyage de certaines roches (calcaires, Basaltes, laitiers, Bentonites, ...). Ces produits agissent grâce à une granulométrie appropriée sur certaines qualités du ciment. Les roches dures, comme le quartz, produisent généralement des particules plus anguleuses, dont la demande en eau est supérieure à celle demandée par les fillers calcaires. Les fillers présentent une certaine activité physico-chimique. Ils jouent tout d'abord un rôle de nucléation vis-à-vis de l'hydratation du clinker. Cet effet n'est cependant notable qu'aux jeunes âges. A long terme, les fillers siliceux peuvent contribuer faiblement à une réaction pouzzolanique, alors qu'en présence d'aluminates, les fillers calcaires conduisent à une formation rapide de composés appelés carbo-aluminates, ayant un certain pouvoir liant.

- *Additions calcaire* : le calcaire (CaCO₃) appartient aux roches carbonatées riches en chaux (CaO). Il est contenu dans la calcite, l'aragonite ou la marne. Le calcaire constitue une matière première pour la fabrication du ciment. Des études ont montré certains avantages de

l'utilisation du calcaire comme ajout en remplacement du gypse (EL-Alfi, 2000). Les deux principales caractéristiques du calcaire normalisé sont :

- la teneur en carbonate de calcium (CaCO_3) supérieure ou égale à 75 % en masse ;
- une valeur faible de l'indice d'activité.

b. les additions de type II: Ce sont des matériaux finement broyés à caractère inorganique, **pouzzolanique** ou **hydraulique latent**. Ils ont une **teneur élevée en dioxyde de silicium** seul ou, en dioxyde de silicium et oxyde d'aluminium combinés. Parmi ces additifs on distingue la fumée de silice, le laitier, les cendres volantes et les pouzzolanes naturelles.

- *Cendres volantes* : les cendres volantes résultent de la combustion du charbon dans les centrales thermiques ; elles sont récupérées au moyen de séparateurs pneumatiques et électrostatiques puis humidifiées pour faciliter la manutention. Selon la norme NF EN 450 (1995), les cendres volantes sont une poudre fine constituée principalement de particules vitreuses sous forme sphériques. Les compositions chimiques des cendres volantes dépendent des impuretés contenues dans le charbon utilisé. Du point de vue minéralogique, les cendres volantes se divisent en deux catégories qui diffèrent l'une de l'autre par leur teneur en CaO, selon la norme ASTM C 618-94 (1995):
 - Classe F : les cendres volantes contenant moins de 10 % de CaO produit de la combustion de l'antracite et du charbon bitumineux ;
 - Classe C : les cendres volantes contenant entre 15 % et 35 % de CaO produit de la combustion du lignite ;
- *Fumées de silice* : les fumées de silice sont des sous-produits de la fabrication du silicium ou de ferrosilicium. Ils se présentent sous forme de microsphères de silice ayant des diamètres moyens de 0,1 μm . La surface spécifique varie de 20 à 25 m^2/g . Les fumées de silice se caractérisent par une structure vitreuse (produit très réactif) avec une haute teneur en silice (de 75 à 95%). Les fumées de silice agissent de trois façons dans les bétons ; action physique, physicochimique et pouzzolanique. En effet, l'action physique consiste à chasser l'eau qui se trouve entre les particules de ciment, ce qui plastifie le béton ayant un rapport E/L de 0,15 à 0,20. L'action physico-chimique se manifeste par un bouchage des pores de 0,1 mm de diamètre à partir de l'âge de 7 jours, ce qui rend le béton à la fumée de silice tout à fait imperméable. Son action pouzzolanique consiste à se combiner avec la chaux libérée par la réaction d'hydratation et former des nouveaux hydrates. La proportion de fumée de silice dans

le ciment est limitée à 10 % en masse, selon NA 442 et EN 197-1 (NA 442, 2000 ; EN 197-1, 1996).

- *Laitier des hauts fourneaux* : les laitiers des hauts fourneaux sont des sous-produits de la fabrication de la fonte des usines sidérurgiques. Le laitier des hauts fourneaux est utilisé généralement dans les ciments et dans les travaux routiers. La structure minéralogique d'un laitier dépend de son mode de refroidissement, plus le refroidissement est rapide plus le laitier est vitreux. Le laitier refroidi est en forme de granules ou boulettes et demande un broyage pour être utilisé comme ajout minéral. Une fois utilisé avec le ciment, il a le pouvoir de s'hydrater après la saturation du milieu de chaux et former de nouveaux hydrates qui contribuent à améliorer les résistances mécaniques. Les particules de laitier, dont le diamètre est inférieur à 10 μm , contribuent à la résistance du béton aux jeunes âges (jusqu'à 28 jours). Les particules dont les diamètres sont compris entre 10 et 45 μm contribuent au développement des résistances ultérieures. Les particules de laitier dont le diamètre est supérieur à 45 μm ont de la difficulté à s'hydrater.
- *Pouzzolanes naturelles* : les pouzzolanes sont des roches naturelles formées par des projections volcaniques scoriacées. Leur couleur est généralement noire ou rouge selon le degré d'oxydation du fer. Les pouzzolanes sont utilisées pour la fabrication du ciment. Selon la norme algérienne NA 442 (2000) et la norme européenne EN 197-1 (1996) les pouzzolanes naturelles se présentent en deux sortes :
 - Des substances d'origine volcanique (verre volcanique, ponce, rhyolite, tuf, zéolite) ou des roches sédimentaires (terre à diatomées, diatomites, gaize) ayant une composition chimique et minéralogique appropriée ;
 - Des argiles et des schistes activés thermiquement.
- *Méta kaolin* : le méta kaolin est obtenu par calcination d'argile kaolinitique à une température comprise entre 650 et 850 °C, suivie d'un broyage permettant d'atteindre une finesse très élevée. La formation du métakaolin est sensiblement influencée, par la présence d'impuretés ou par l'état de cristallisation du minéral de départ. Le matériau obtenu présente une pouzzolanicité élevée et peut être considéré comme une addition très active.

Chapitre 4 :
Caractéristiques principales
des mortiers.

4.1 Définition

Le **mortier** est un matériau pouvant satisfaire à une variété d'exigences dans le domaine de la construction. Toutefois, il n'existe pas de mortier universel, convenant à toutes les situations. Le Concepteur ne pourra choisir le mélange convenant le mieux pour un projet donné que s'il a une bonne connaissance des matériaux qui entrent dans la composition du mortier et de leurs propriétés. La fonction principale d'un mortier est de liasonner les éléments de maçonnerie de manière à ce qu'ils constituent un seul bloc. Par ailleurs, le mortier sépare les éléments et remplit toutes les fentes et fissures en formant une surface de contact homogène. Le rejointoiement doit permettre de renforcer les propriétés structurales des éléments et en même temps empêcher la pénétration de la pluie. Ceci exige une adhérence complète. Si elle est réalisée, le mur aura une durabilité suffisante pour résister aux éléments.

4.2 Composition

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

- **Liants** : peut être du ciment portland, de la chaux ou du ciment de maçonnerie, ou un des divers mélanges de ces matériaux.

- **La chaux** : qui est le composant traditionnel du mortier, possède une plasticité et un pouvoir de rétention d'eau excellent, mais sa résistance mécanique est faible et sa cure est lente. La cure des mortiers de chaux s'effectue lentement par carbonatation sous l'effet du gaz carbonique de l'air; ce processus peut être fortement ralenti par temps froid et humide.

- **Le ciment de maçonnerie** : est un produit déposé contenant du ciment portland et un filler minéral inerte (calcaire) et des adjuvants tels que des agents mouillants, des agents hydrofuges et des entraîneurs d'air.

- **Les adjuvants** : donnent la plasticité et le pouvoir de rétention d'eau que confère la chaux aux mortiers de ciment et chaux. Certains ciments de maçonnerie sont des mélanges de ciment portland et de chaux hydratée, avec en plus des adjuvants.

- **Granulats** : Le sable est le granulat le plus employé fréquemment. Il est inerte et sert tout d'abord à accroître la compacité. Ses limites granulométriques sont entre 0,080 mm et 4 mm.

- **Eau** : remplit un double rôle: elle sert à hydrater le ciment et ce qui est plus important, elle contribue à son ouvrabilité. Les mortiers devraient contenir la quantité d'eau maximale

compatible avec une ouvrabilité optimale. L'eau devrait être propre et ne pas contenir de produits nocifs tels que des acides, des alcalis ou des matières organiques. Lorsqu'elle est potable, on peut l'utiliser.

• **Adjuvants** : sont employés pour les mortiers de maçonnerie et dans certains cas leur emploi est certainement avantageux. Cependant, leur emploi n'est généralement pas recommandé.

4.3 Les différents types de mortiers

- Les mortiers de ciment : Les mortiers de ciment, très résistants, prennent et durcissent rapidement. De plus un dosage en ciment insuffisant les rend pratiquement imperméables. Les dosages courants sont de l'ordre de 300 à 400 kg de ciment pour 1 m³ de sable.
- Les mortiers de chaux : Les mortiers de chaux sont gras et onctueux. Ils durcissent plus lentement que les mortiers de ciment, surtout lorsque la chaux est calcique.
- Les mortiers bâtards : Le mélange de ciment et de chaux permet d'obtenir conjointement les qualités de ces deux liants. Généralement, on utilise la chaux et le ciment par parties égales; mais on mettra une quantité plus ou moins grande de l'un ou de l'autre suivant l'usage et la qualité recherchée.

4.4 Propriétés

D'après leurs propriétés, les mortiers se subdivisent en deux catégories: les mortiers plastiques et les mortiers durcis.

4.4.1. Mortier plastique

La propriété la plus importante du mortier plastique est son 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. L'ouvrabilité ne se mesure pas avec précision en laboratoire mais le maçon peut l'évaluer en observant le comportement du mortier lorsqu'il l'étale avec sa truelle. L'ouvrabilité est due à l'effet de (roulement à billes) résultant de la lubrification des granulats par le lait de ciment. Bien que la classe des granulats et la proportion des matériaux jouent un rôle important, c'est la teneur en eau qui détermine les valeurs finales du retrait et le maçon peut la contrôler à la mise en œuvre.

Une bonne ouvrabilité et un bon pouvoir de rétention d'eau sont essentiels à une qualité maximale du rejointoiment.

a) Mesure de l'ouvrabilité du mortier

L'essai d'étalement permet de déterminer l'étalement des échantillons de mortiers destiné à la confection des éprouvettes de compression. L'essai d'étalement est réalisé sur une table mobile comportant un plateau plan relié par charnières à une base rigide. Un moule en forme de tronc de cône de diamètre à la base $D_0=10$ cm posé au centre du plateau (figure4.1).

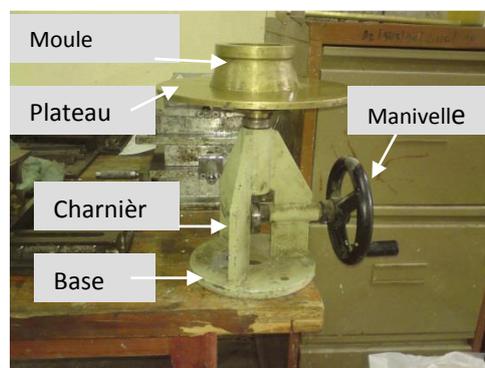


Figure 4.1 : Table à choc

Le moule et le plateau sont préalablement huilés. Le cône est rempli par une quantité de mortier par couches successives, chaque couche est compactée par piquage à l'aide d'une tige. On remonte verticalement le moule sans mouvement latéral et on laisse le mortier s'étaler sur la plaque métallique. En utilisant la manivelle, on applique 15 cycles de chute. Chaque cycle dure entre 1 et 3 secondes. La hauteur de chute du plateau mobile est de 15 mm (figure 4.2). On mesure différents diamètres D_i qu'occupe le mortier étalé sur la table, et on calcule l'étalement comme suit :

$$\text{étalement} = \frac{D_m - D_0}{D_0} \cdot 100$$

Avec :

D_m : le diamètre moyen du mortier étalé.

D_0 : le diamètre de la base du moule tronconique.



a) Remplissage du moule b) application des coups et étalement c) mesure des diamètres

Figure 4.2 : Etape suivie pour calculer l'étalement d'un mortier.

Le tableau 3.5 montre l'ouvrabilité du mortier en fonction des résultats d'étalement trouvés à l'aide de la table à chocs.

Tableau 4.1 : Ouvrabilité du mortier

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

Exemple :

Soit un mortier normal avec un diamètre moyen après l'essai d'étalement $D_m = 15$ cm.
Le moule de cône de diamètre à la base $D_0 = 10$ cm.

$$\text{étalement}(\%) = \frac{D_m - D_0}{D_0} \times 100 = \frac{15 - 10}{10} \times 100 = 50\%$$

D'après le tableau 4.1 : pour un étalement de 50% on aura une ouvrabilité ferme

4.4.2. Mortier durci

Le mortier durci possède un certain nombre de propriétés de résistance mécanique d'importance majeure. La solidité du rejointoiement entre le mortier et l'élément est très importante, ainsi que la bonne ouvrabilité et un bon pouvoir de rétention d'eau donnent au

rejointoiement une force maximale et par le fait même ces qualités sont plus importantes que la résistance du mortier à la compression. La résistance à la flexion est également importante, parce qu'elle détermine la capacité d'un mortier à résister à la fissuration. 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.

b) Essai de la résistance à la traction par flexion

La résistance à la traction par flexion des mortiers a été évaluée par des essais de flexion 3 points effectués sur des éprouvettes prismatiques $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$, avec une vitesse de chargement de 50 N/s.

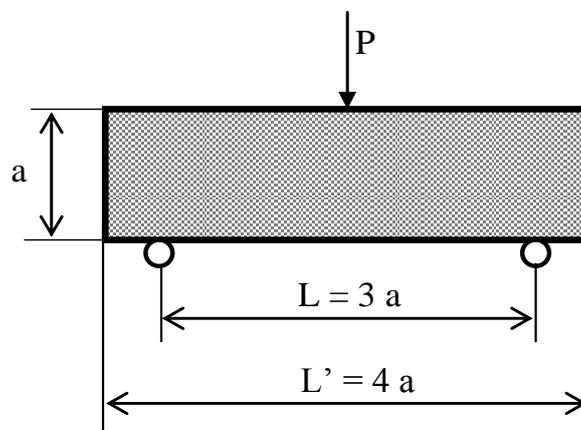


Figure 4.3 : Schéma de calcul de la flexion.

La formule de la RDM pour le calcul de la contrainte de flexion est donnée comme suit :

$$R_f = \frac{M}{I} y$$

Avec :

M : moment de flexion, $M = \frac{PL}{4}$ ($L = 3a$)

I : moment d'inertie de la section transversale, $I = \frac{bh^3}{12} = \frac{a^4}{12}$

Y : distance de la fibre la plus éloignée à l'axe neutre, $y = \frac{a}{2}$ d'où :

$$R_f = \frac{9P}{2a^2}$$

Où :

R_f : est la résistance à la flexion, en newtons par millimètre carré (MPa);

a : est le côté de la section carrée du prisme, en millimètres;

P : est la charge appliquée au milieu du prisme à la rupture, en newtons.

c) Essai de la résistance à la compression

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

$$R_c = \frac{F_c}{A} \quad (\text{MPa})$$

Avec :

F_c : Charge maximale de rupture (N).

A : l'aire de la section d'application de la force de compression (1600 mm²).

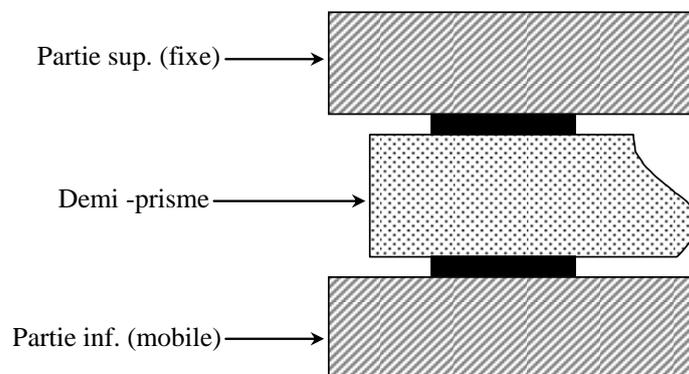


Figure 4.4 : Essai de compression simple.

Exemple :

Déterminer la résistance à la traction et à la compression d'un ciment portland à 28 jours coulé sur une éprouvette prismatique (4×4×16) cm. Sachant que les valeurs de l'effort affiché sur le comparateur de la presse et de 2000N pour la flexion et 45000 pour la compression.

✓ La résistance à la traction

$$R_f = \frac{9P}{2a^2} = \frac{9(2000)}{2 \times (40)^2} = 5.62MPa$$

✓ La résistance à la compression

$$R_C = \frac{F_c}{A} = \frac{45000}{1600} = 28.12MPa$$

4.5. Emplois des mortiers

- Le hourdage de maçonnerie : La construction réalisée en éléments maçonnés (blocs de béton, pierre de taille, briques), nécessite leur assemblage avec un mortier qui doit présenter des caractéristiques mécaniques suffisantes pour assurer la transmission des charges et une compacité suffisante pour être étanche.



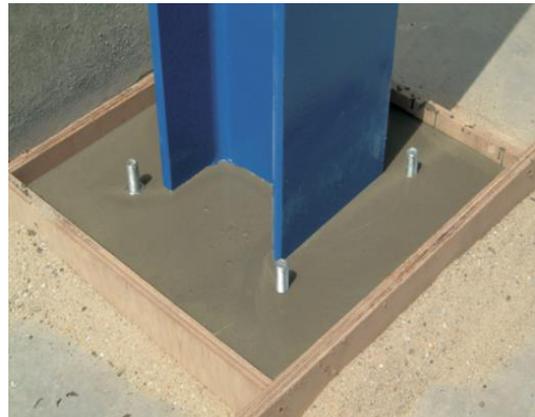
- Les enduits : Ce domaine d'application constitue l'un des plus vastes débouchés des mortiers. A cote des enduits traditionnels en trois couches, se développent aujourd'hui des enduits monocouches épais, ainsi que des enduits isolants.



- Les chapes : Les chapes ont pour fonction d'assurer la mise a niveau du dallage et la régularité de sa surface. Les chapes peuvent constituer la finition. Elles peuvent aussi constituer le support d'un revêtement de sol



- Les scellements et les calages : La multiplicité des problèmes de scellement et de calage a conduit les producteurs de mortiers industriels a mettre au point des produits spécifiques adaptes aux travaux a réaliser : scellements d'éléments de couverture, d'éléments de second œuvre, de mobiliers urbains, de regards de visite



Référence Bibliographiques

S. ARNAUD (DLL), ‘‘Matériau béton Fabrication en centrale BPE Mise en œuvre’’. 19-20 janvier 2011.19.

Ezziane K., ‘‘Etude des modifications physico-mécaniques apportées par les ajouts minéraux aux bétons’’, Thèse de Doctorat d’Etat, UST Oran (Algérie), 2006.172p.

Dreux G., Festa J., Nouveau guide du béton et ses constituants, Edition Eyrolles, France, 2002, 409p.

T.BOUBEKEUR, "Evaluation des performances des ciments portland au calcaire", thèse de Magister, Université de Chlef, 2009, 107 p.

Neville A.M., Propriétés des bétons. Quatrième édition. Edition française par CRIB, Editions Eyrolles, 2000.

R. LANCHON. Cours de laboratoire 2. ‘‘GRANULATS BTEONS SOLS’’. 1988.

François de LARRARD. CONSTRUIRE EN BETON. Presses de l’école nationale des ponts et chaussées.2002.

Normalisation

NF EN 196-6, "Méthodes d’essais des ciments – partie 6 : détermination de la finesse", 1996, 17 p.

NF EN 196-3, "Méthodes d’essais – partie 3 : détermination du temps de prise et de stabilité", 1996, 13 p.

EN 197-1, "Ciment : Composition, spécifications et critères de conformité-partiel 1 : ciments courants", 1996, 27 pages.

NF EN 196-1, "Méthodes d'essais des ciments – partie 1 : Détermination de la résistance", 1996, 31 p.

ASTM C 618-94., "Standard Specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use as a mineral admixture in Portland cement concrete", ASTM Standards in ACI 301 and 318, Publication SP-71, 1995, ACI, Farmington Hills, pp.238-240.

NA 442, "Liants hydrauliques – Ciments courants : Composition, spécifications et critère de conformité", IANOR, Alger, 2000, 30p.