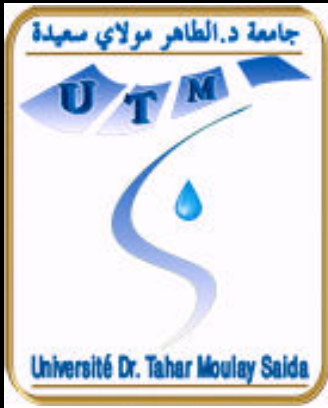




**Ministère de l'Enseignement Supérieur et
de la Recherche Scientifique**

Université Dr Tahar Moulay

Faculté de Technologie

Département de Génie Civil et Hydraulique



**MATERIAUX DE CONSTRUCTION
COURS ET TRAVAUX PRATIQUES**

Dr BENGUEDIAB Soumia

Maitre de Conférences B

Année Universitaire 2015-2016

Table des matières

Préface

i

COURS

I.	Chapitre I: Généralités	1
I.1.	<i>un peu d'histoire</i>	1
I.2.	<i>Classification</i>	2
I.3.	<i>Les propriétés des matériaux de construction</i>	3
I.2.1.	<i>Propriétés physiques</i>	3
I.2.2	<i>Propriétés mécaniques</i>	4
I.2.3.	<i>Propriétés chimiques</i>	4
I.2.4.	<i>Propriétés physico-chimiques</i>	4
I.2.5.	<i>Propriétés thermiques</i>	4
II	Chapitre II: Les granulats	5
II-1-	<i>Définition</i>	5
II-2-	<i>Utilisation</i>	5
II-3-	<i>Classification des granulats</i>	5
II-4-	<i>Propriétés des granulats</i>	8
II-4-1-	<i>Analyse granulométrique</i>	8
II-4-2-	<i>Coefficient d'uniformité des granulats</i>	10
II-4-3-	<i>Essai d'équivalent de sable</i>	10
II-4-4-	<i>Essai de propreté du gravier</i>	11
II-4-5-	<i>Essai de fragmentation dynamique et Essai Los Angeles</i>	11
II-4-6-	<i>Module de finesse</i>	12
II-5-	<i>Extraction -Traitement- fabrication des granulats</i>	13
II-5-1-	<i>Extraction</i>	13
II-5-2-	<i>Traitement</i>	14
III	Chapitre III: Les Liants	15
III-1	<i>Généralités</i>	15
III-2	<i>La chaux</i>	15
III-2-1	<i>Définition</i>	15
III-2-2	<i>Utilisation de la chaux</i>	16
III-3	<i>Le Ciment</i>	17
III-3-1	<i>Histoire et définition</i>	17
III-3-2	<i>Principe de fabrication du ciment</i>	18
III-3-3	<i>Ciments avec Constituants secondaires</i>	20
III-3-4	<i>Propriétés principales</i>	21
III-3-5	<i>Différentes catégories de ciment et utilisations</i>	22
IV	Chapitre IV : Les Mortiers	28

IV-1	<i>Introduction :</i>	28
IV-2	<i>Composition</i>	28
IV-3	<i>Les différents mortiers</i>	30
IV-3-1	<i>Mortiers fabriqués sur chantiers</i>	30
IV-3-2	<i>Mortiers industriels</i>	30
IV-4	<i>Caractéristiques Principales</i>	30
IV-4-1	<i>Ouvrabilité</i>	32
IV-4-2	<i>Prise</i>	33
IV-4-3	<i>Résistances mécaniques</i>	33
IV-4-4	<i>Retraits et gonflements</i>	35

TRAVAUX PRATIQUES

TP 1	<i>Mesure de la masse volumique absolue des grains</i>	36
TP 2	<i>Mesure de la masse volumique apparente</i>	40
TP3	<i>Teneur en eau d'un granulat</i>	43
TP4	<i>Analyse granulométrique</i>	46
TP5	<i>Equivalent de sable</i>	56
TP6	<i>Temps de prise</i>	62
	<i>Bibliographie</i>	69

PREFACE

Ce document présente les cours ainsi que la description de quelques **travaux pratiques de matériaux de construction** destiné aux étudiants de 2^{ème} Année Licence de **génie civil**.

Le cours «Matériaux de construction» est une des disciplines essentielles dans le domaine du Génie Civil et de la branche des ponts et chaussées.

Ce cours s'adresse en priorité aux étudiants de génie civil travaillant dans le domaine de la construction.

Il résume les différents types de matériaux de construction utilisés ainsi que les composites dont, les constituants de base sont similaires ou proches de ceux utilisés dans la formulation des matériaux classiques (béton, mortier, composite, plâtre, argile...etc.).

- Permettre aux étudiants de connaître des différents types de matériaux de construction
Connaître les processus d'élaboration des différents matériaux, de la matière première jusqu'au produit fini,
- Renforcer la compréhension nécessaire concernant les propriétés principales des matériaux de construction et leurs domaine d'emploi le plus efficace
- Permettre aux étudiants de connaître la nature, le principe de fabrication et les applications en fonction de leurs comportements
- Renforcer les connaissances pour pouvoir effectuer les différents essais sur les matériaux de construction
- Identifier l'expérimentation de chaque matériau en vue de mesurer ses caractéristiques physiques, chimiques et mécaniques,
- Permettre à l'étudiant d'améliorer les propriétés mécaniques des matériaux de construction
- . Opérer un choix optimal des matériaux en tenant compte des conditions d'utilisation, d'économie et de sécurité.

- A la fin de l'année en cours, l'étudiant doit être capable de citer les phases de fabrication de chaque matériau de construction étudié, de mesurer au laboratoire ses différentes caractéristiques et d'optimiser -à travers ses propriétés- ses domaines d'utilisation

Connaître des différents types de matériaux de construction;

Renforcer la compréhension concernant les propriétés principales des matériaux de construction et leurs domaines d'emploi le plus efficace;

Permettre aux apprenants de connaître la nature, le principe de fabrication et les applications en fonction de leurs comportements;

Renforcer les connaissances pour pouvoir effectuer les différents essais sur les matériaux de construction;

Procédés d'amélioration de certaines propriétés des matériaux de construction;

Renforcer les connaissances sur la durabilité des matériaux de construction ainsi que leur dégradation dans le temps. Il s'agit de faire une synthèse des Facteurs de Durabilité, avec une prise en compte des paramètres intervenant dans les phénomènes de dégradation.

Ce polycopié est scindé en deux parties, la première partie est consacrée au cours et comportant quatre chapitres importants sur les matériaux de construction et dans la deuxième partie les différents travaux pratiques sont présentés.

Ce document que j'espère enrichir la bibliothèque du département et sera très utile pour les

Etudiants en génie civil pour remettre en mémoire quelques notions élémentaires et indispensables dans le domaine de matériaux de construction.

Dr S. BENGUEDIAB

Maître assistante Classe B

Département de génie civil et Hydraulique

Faculté de Technologie

Université Moulay Tahar de Saida

PARTIE A

COURS

Chapitre 1

GENERALITES

1-1 -UN PEU D'HISTOIRE :

Les hommes, dès leur origine ont cherché à se défendre et à s'abriter, au début leurs abris étaient des grottes naturelles ou artificielles, très rapidement sont venus à l'utilisation pour la confection de leur habitation, de matériaux naturels (bois, pierre, argile. C'est aussi l'origine de l'architecture, les hommes ont en effet essayé d'obtenir des formes équilibrées dans l'assemblage des matériaux ; l'évolution de cet art est relativement lente au début de la civilisation, des vestiges en témoignant la valeur architecturale.

- A Ninive et Babylone des vestiges de briques séchées et de pierre font apparaître un goût très sur, les assyriens utilisaient le bitume comme agglutinant, c'est à eux que l'on doit l'origine de la voûte dans la construction.
- Les égyptiens avec leurs temples, sépultures et sculptures monumentales, utilisaient de gros blocs de pierre assemblés à sec.
- Les chinois de leur côté, avec « la muraille de chine » qui est une association du granite soubassement, de brique en parement et de pisé (mélange de terre et graviers) comme remplissage, réalisé un ouvrage qui a résisté à l'action du temps.
- Les grecs améliorent l'art de construire en harmonisant les formes et les proportions pour atteindre un degré de perfection très élevé.
- Les romains, qui ont laissé de nombreux trésors artistiques, font évoluer l'art de bâtir par l'utilisation rationnelle des matériaux et des liants (chaux et ciment), ils sont à l'origine des principes de l'urbanisation.

Il faut attendre le 11^{ème} siècle pour voir l'architecture évoluer à nouveau, tout d'abord le style roman, caractérisé par l'équilibre des voûtes (plein cintre) et la réalisation des coupes, au quel fait suite l'art gothique (arc en ogive) dont la période flamboyante atteint très haut lyrisme.

Au 17^{ème} siècle (Louis XIV) l'architecture est plus raffinée.

Au milieu du 19^{ème} siècle, les progrès techniques transforment l'art de construire surtout par la manière d'utiliser les matériaux mais les réalisations n'ont pas de

caractère, au milieu du 20^{ème} siècle, par l'utilisation de plus en plus grande du béton, une évolution apparaît les formes sont élancées, dépouillées et harmonieuses.

L'objectif de la science des matériaux de construction serait de permettre un choix optimal des matériaux de construction utilisés dans la réalisation d'un projet, en prenant en compte les conditions d'économie et de sécurité.

1-2-CLASSIFICATION DES MATERIAUX DE CONSTRUCTION :

On peut classer les matériaux de construction en deux classes:

- 1- Les matériaux de résistance (granulats, liants, acier, ...)
- 2- Les matériaux de protection (enduit, peinture, vernis, ...), qui protègent les matériaux de construction supports des agents extérieurs (rouille, corrosion, insalubrité, ...)

On peut aussi classer les matériaux de construction selon leur :

- Elaboration qui dépend de 3 paramètres
 1. nature de la matière première (naturelle ou artificielle),
 2. propriétés spécifiques (béton étanche, béton décoratif,)
 3. domaines d'utilisation (Bâtiment, Travaux publics, fluviaux, Travaux maritimes)
 - Comportement mécanique : Le matériau ne répond pas de la même manière aux différentes charges auxquelles il est soumis; il peut à fortiori bien résister à la flexion et résister moins bien à la torsion et pas du tout à la traction.

L'expérimentation permet la connaissance de la résistance limite qu'entraîne la rupture du matériau. Cette résistance est souvent le rapport entre la force de rupture et la section ayant subi cette force.

- Durabilité : définit la durée de la persistance de certaines caractéristiques et allure de leur évolution dans le temps sous l'effet des agents agressifs de l'environnement.

La durabilité traduit la résistance du matériau à la dégradation. Le matériau a une durée de vie limitée car il subit graduellement des modifications physiques, chimiques et mécaniques qui réduisent sa performance.

1-3-PROPRIETES DES MATERIAUX DE CONSTRUCTION :

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

Les propriétés principales des matériaux sont variées :

1-3-1- Propriétés physiques:

***Homogénéité** : le matériau est dit homogène, si on découpait ce dernier en morceaux très petits, on devrait retrouver les mêmes constituants.

***Isotropie** : si on prend un point défini dans un matériau, pour qu'il soit isotrope, il faut qu'autour du point et dans toutes les directions, on ait les mêmes propriétés.

***Masses volumiques** : résultat du rapport : Masse / volume du matériau.

La masse volumique est dite apparente si le volume du quotient est le volume total du matériau. En revanche, la masse volumique est absolue si le volume du quotient est le volume des grains solides.

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

$$\rho_{\text{abs}} = \frac{M}{V_s}$$

La masse volumique s'exprime en g/cm^3

***Densité**: rapport de la masse volumique du matériau et la masse volumique de l'eau dans les mêmes conditions de mesure ($T = 20^\circ\text{C}$).

***Porosité** : résultat du rapport du Volume des vides / volume du matériau.

$$n = \frac{V_v}{V_T} \times 100$$

***Compacité** : c'est le résultat du rapport du volume des grains solides / volume total.

$$c = \frac{V_s}{V_T} \times 100$$
$$c = 1 - n$$

n et c s'expriment en %

***Indice des vides** : c'est le résultat du rapport du volume des vides solides / volume des grains solides.

$$e = (V_v / V_s) \times 100 ; e = n / c ; [e] = \%$$

***Teneur en eau** : c'est le résultat du rapport Masse de l'eau / masse sèche du matériau.

$$w = (M_h - M_s / M_s) \times 100 ; [w] = \%$$

1-3-2- Propriétés mécaniques: résistance en compression, en traction, en torsion,...

1-3-3- Propriétés Chimiques: résistance à la corrosion, aux acides,...

1-3-4- Propriétés physico-chimiques: absorption, perméabilité, retrait, le gonflement,...

1-3-5- Propriétés thermiques: dilatation, résistance, comportement au feu, Chaleur spécifique, Coefficient d'expansion thermique....

Chapitre 2

LES GRANULATS

2-1-Définition :

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

Exemple :

Sables, gravillons /graviers, granulats artificiels, grains de polystyrène, déchets de métallurgie, etc...

2-2-Utilisation :

Les granulats sont utilisés pour la réalisation des :

Filtres sanitaires, drains, bétons, remblais routiers, etc....

2-3- Classification des granulats :

*Selon la nature minéralogique :

Roches magmatiques : - granulat de bonne qualité : exemple le granit, le quartz

Roches sédimentaires : - non recommandé pour le béton : le calcaire

- bons granulats : exemple : le gneiss

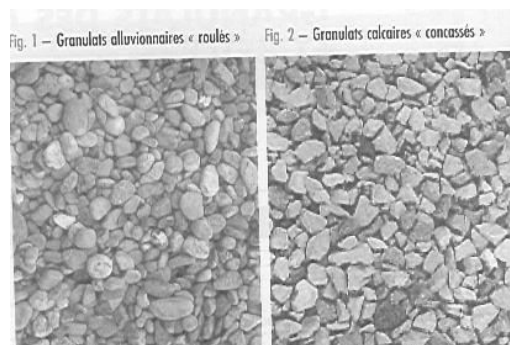
Roches métamorphiques : -non recommandé pour le béton : le schiste

* Selon la forme des grains :

Elle est soit naturelle, soit artificielle.

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

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



Phot. 1.1. : Exemple de granulats concassés et roulés

* Selon les caractéristiques physiques :

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

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

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

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

Exemple :

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

vides entre les grains est :

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

La masse volumique de ce granulat est : $1\,520 \text{ kg /m}^3$.

Sa masse spécifique est : 0.600

$$1520 = 2550 \text{ kg /m}^3$$

Sa densité apparente est : 1,52

Sa densité absolue est : 2,55

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

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

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

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

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

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

A noter:

On a:

$$\frac{V_v}{V} = \frac{V_v}{V - V_v} * \frac{V - V_v}{V}$$

Soit : $n = e.C$ ou encore $e = \frac{C}{n}$

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

Exemple :

Supposons que l'on soit en présence d'un granulat alvéolaire (argile expansée par exemple). Si la masse nette d'un mètre cube de ce granulat (non tassé) est de 460 kg, on dira que sa masse volumique est de 460kg/m³ et sa densité apparente de 0,46. Si les grains occupent dans ce mètre cube un volume réel de 525 l (non compris les vides entre eux) la masse volumique par grain est : 460/0.525 = 880 kg /m³ et la densité absolue des grains est de : 0,88

Si dans un grain le volume des pores ou alvéoles est de 65%, la compacité d'un grain sera (rapport du volume de matière pleine au volume totale du grain): $C = (1 - 65 / 100) = 0,35$

La densité absolue de la matière argileuse constituant le grain sera : 0,88/0,35 = 2,52.

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

* Selon la nature des granulats :

Les granulats courants

On désigne sous le vocable granulats courants, ceux de masse volumique $\in [2 ; 3 \text{ tonnes/m}^3]$.

Ce sont généralement les *Basaltes, Quartzites, Grès, Porphyre, Diorite, granites, Schistes, Laitier*.

Pour la composition des bétons, on utilise en général des matériaux naturels alluvionnaires : sables et graviers. Cependant, lorsque ces matériaux font défaut localement, il est possible d'utiliser des roches éruptives ou sédimentaires transformées en granulat par concassage. Silex, calcaires durs, silico-calcaires.

Les granulats lourds

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

-La barytine, sa densité absolue est 4,2 à 4,7

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

Les granulats légers :

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

La densité absolue de ces granulats est

Généralement inférieure à 1.

Exemple :

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

Granulats très durs :

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

* Selon la dureté du granulat :

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

A noter :

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

2-4-propriétés des granulats :

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

2-4-1-Analyse granulométrique :

L'analyse granulométrique est le procédé par lequel on détermine la proportion des différents constituants solides d'un sol en fonction de leur grosseur à l'aide de tamis.

On appelle « refus » sur un tamis le matériau qui est retenu par le tamis, et « tamisas » ou « passants » le matériau qui passe à travers les mailles d'un tamis. L'essai a pour but de déterminer les proportions pondérales des grains de différentes dimensions qui constituent le sol. Les pourcentages ainsi obtenus sont exprimés sous forme d'un graphique appelé courbe granulométrique. Ainsi en fonction de la dimension des grains, on distingue :

- les cailloux & pierres	$25 \text{ mm} < D$
- les gravillons grossiers	$20 \text{ mm} < D < 25 \text{ mm}$
Moyens	$12,5 \text{ mm} < D < 16 \text{ mm}$
Fins	$8 \text{ mm} < D < 10 \text{ mm}$
- les sables grossiers	$2,5 \text{ mm} < D < 5 \text{ mm}$
Moyens	$0,63 \text{ mm} < D < 1,25 \text{ mm}$
Fins	$80 \text{ }\mu\text{m} < D < 315 \text{ }\mu\text{m}$
- Les Fillers	$D < 80 \text{ }\mu\text{m}$

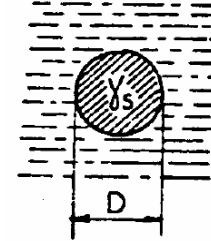


Tableau 1.1 : Définition des classes de dimensions selon la norme AFNOR 18-540

A noter :

1. En géotechnique la classification des sols et la représentation des courbes granulométriques est différente

2. 1 micron = $10^{-6} \text{ m} = 10^{-3} \text{ mm}$

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

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

0,063 – 0,08 – **0,125** – 0,16 – 0,2 – **0,25** – 0,315 – 0,4 – **0,5** – 0,63 – 0,8 – **1** –
1,25 – 1,6 – 2 – 3,15 – **4** – 6,3 – **8** – 10 – 12,5 – 14 – **16** – 20 – 25 – **31,5** –
40 – 50 – **63** – 80 – 100 – **125**.

Et encore :

1. Les tamis dont les dimensions sont soulignées et notées en gras correspondent à la série de base préconisée. De ce fait, lors d'une étude granulométrique, ils doivent être utilisés en plus de tout autre tamis nécessaire à l'établissement de la courbe.

2. On trace la courbe granulométrique sur un graphique comportant en ordonnée le pourcentage des tamisas. Les mailles D sont indiquées en abscisse selon une graduation logarithmique. La suite des valeurs de D est une progression géométrique de raison $\sqrt[10]{10} = 1,25$

3. En géotechnique la représentation des courbes granulométriques est différente

Exemple :(voir TP)

4. Dans le cas d'un béton ou d'un mortier, le % des fines dans les sables doit être inférieur à 10%.

5. Dans le cas d'un béton dont le gravier doit être 5/25, il faut éliminer tous les éléments supérieurs à 25 mm et inférieurs à 5 mm par tamisage.

2-4-2- Le coefficient d'uniformité des granulats :

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

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

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

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

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

2-4-3- Essai d'équivalent de sable :

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

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

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

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

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

Théoriquement les limites extrêmes des valeurs E.S seraient :

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

Valeurs préconisées pour l'E.S :

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

2-4-4- Essai de propreté du gravier :

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

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

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

Le pourcentage d'impureté est :

$$= \frac{(P_1 - P_2) * 100}{P_2}$$

, où P1 le poids initial sec du matériau et P2 son poids sec après lavage au tamis 0,5mm

2-4-5- Essai de fragmentation dynamique et essai Los Angeles :

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

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

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

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

A noter :

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



Appareil Los Angeles



Appareil de fragmentation dynamique

Phot.2.appareil los Angeles et fragmentation dynamique

2-4-6- Module de finesse d'un granulat :

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

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

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

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

Exemple :

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

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

$$\text{Son module de finesse } M_f = \frac{1}{100} \times 266 = 2,66$$

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

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

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

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

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

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

Correction éventuelle du module de finesse du sable :

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

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

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

Exemple :

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

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

$M_f = 2,5$ (sable corrigé)

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

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

2-5- Extraction – Traitement – Fabrication des granulats :

2-5-1- Extraction :

Les matériaux de construction (pierreux naturels) sont utilisés :

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

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

- Carrières à ciel ouvert
- Carrières souterraines.

Carrières à ciel ouvert :

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

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

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

Carrières souterraines :

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

2-5-2- Traitement :

Concassage :

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

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

Criblage :

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

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

Chapitre 3

LES LIANTS

3 I-Généralités :

Les liants sont des produits plus ou moins naturels, destinés à lier ou assembler entre eux les différents matériaux utilisés dans le grand œuvre, c'est un collage efficace qui pour être durable, et ne doit pas être sensible :

- Au vieillissement, c'est-à-dire conserver le maximum de ses caractéristiques initiales.
- A l'action des éléments naturels surtout l'eau qui peut entraîner des désordres importants.
- A l'attaque de certains corps chimiques.

Les techniques modernes de fabrication permettent d'obtenir des produits traditionnels capables de résister à ces actions.

Les liants traditionnels font prise au contact de l'eau et sont généralement livrés à la construction sous forme pulvérulente à l'exception de la chaux grasse ou chaux aérienne, le classement est essentiellement effectué suivant l'origine du produit.

3-2-la chaux :

3-2-1-Définition :

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

Il existe de type de chaux :

a) Chaux aérienne :

La chaux aérienne est obtenue par calcination d'un calcaire très pur à une température variable de 1 050 à 1 250 °C. Le carbonate de calcium constituant l'essentiel du calcaire, se dissocie pour donner l'oxyde de calcium (CaO, chaux vive) et du gaz carbonique. Suivie d'une extinction à l'eau, durcissait lentement à l'air, ce qui lui a valu son appellation couramment employée de chaux aérienne.

La chaux aérienne ne durcit après gâchage qu'au contact de l'air (CO₂) ;

Le refus au tamis de 800μ est nul et le refus au tamis de 80μ doit être inférieur à 10%.

La masse volumique apparente varie de 500 à 700 kg/m³ et la masse volumique absolue varie de 2200 à 2500 kg/m³

La chaux aérienne résiste bien au feu. Sa résistance réfractaire varie entre 1800 à 2000 °C.

La chaux aérienne prend lentement. Le temps de début de prise est de 600 minutes (10 heures).

b) Chaux hydraulique : la présence de la silice dans la roche calcaire fait naissance de la chaux hydraulique qui résiste mieux que les chaux grasses provenant de calcaires trop purs La

chaux hydraulique après gâchage durcit quant a elle au contact de l'air (part aérienne) et avec l'eau (part hydraulique). Il existe deux types de chaux hydraulique :

c) Les naturelles (XHN) : appartient à l'une des classes de résistance : 30, 60 et 100. Ces classes correspondent à des résistances à la compression minimales à 28 jours et en bars. Ex. : une chaux hydraulique naturelle offrant une résistance à la compression minimale à 28 jours de 60 bars est désignée sous le symbole de XHN 60.

La masse volumique apparente du produit est comprise pour les XHN 30 entre 600 et 750 kg/m³ et pour les XHN 60 et 100 entre 650 et 900 kg/m³,

La masse volumique absolue varie de 2600 à 2900 kg/m³,

La chaux hydraulique en poudre est jaune claire avec des nuances grisâtres. Elle est plus claire que les ciments et contient au moins 10% de chaux libre. T de stockage: 6 mois.

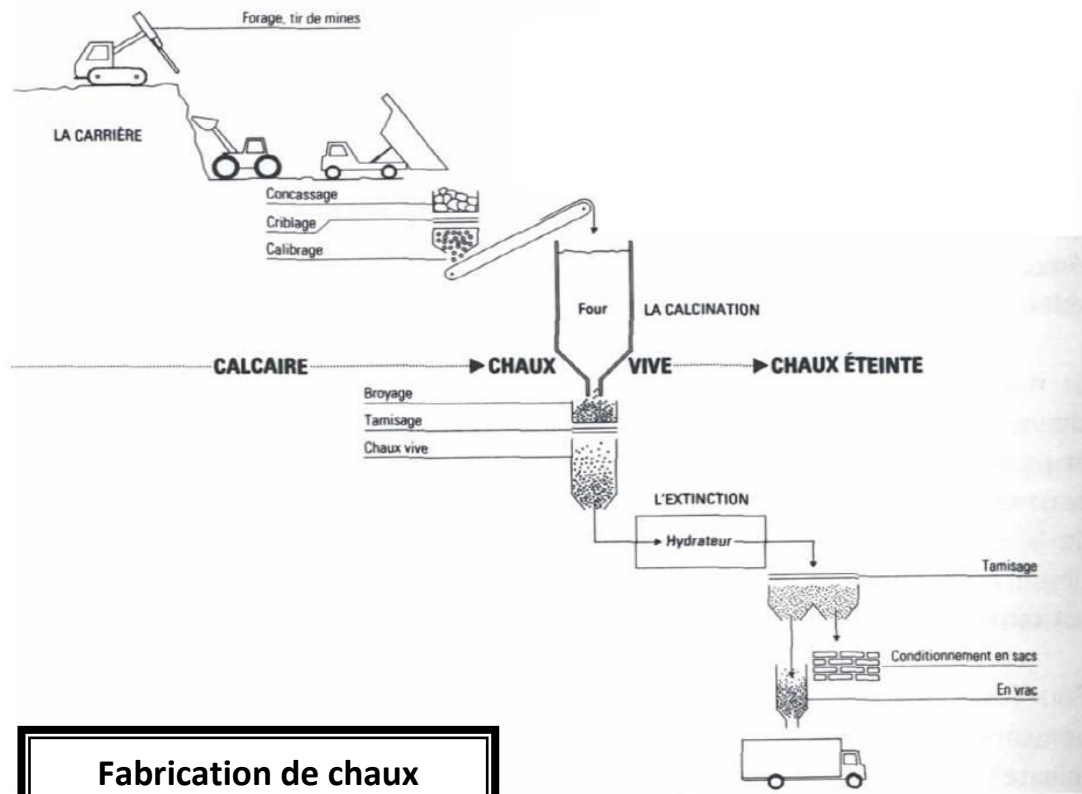
Sa granulométrie doit être telle que le refus au tamis d'ouverture de mailles 200 µm < 10%.

d) Les artificielles (XHA) : qui résultent du broyage simultané de clinker, de ciment et de fillers calcaires, Elles sont également classées selon leur résistance minimale à 28 jours, exprimée en bars. En revanche, la classe 30 n'existe pas pour les XHA.

3-2-2-Utilisation de la chaux dans la construction :

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

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



3-3- ciment :

3-3-1- histoire et définition : Les romains furent les premiers à fabriquer un véritable liant hydraulique en mélangeant de la chaux aérienne avec des cendres volcaniques du Vésuve (cendres volantes appelées Pouzzolane).

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

Le ciment est un produit qui provient de la calcination poussée pouvant atteindre le point de ramollissement d'un composé de :

80% environ de marne calcaire ou carbonate de calcium.

20% d'argile à forte teneur en silicate d'alumine.

Ce mélange peut :

Etre sous forme d'une marne argilo-calcaire de composition stable et ayant plus de 8 % de silicate d'alumine « ciment naturel ».

Etre obtenu par un mélange parfaitement dosé de marne calcaire et d'argile « ciment portland artificiel ».

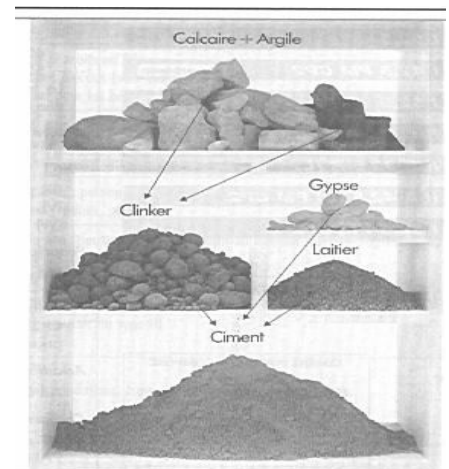
3-3-2- Principe de fabrication du ciment :

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

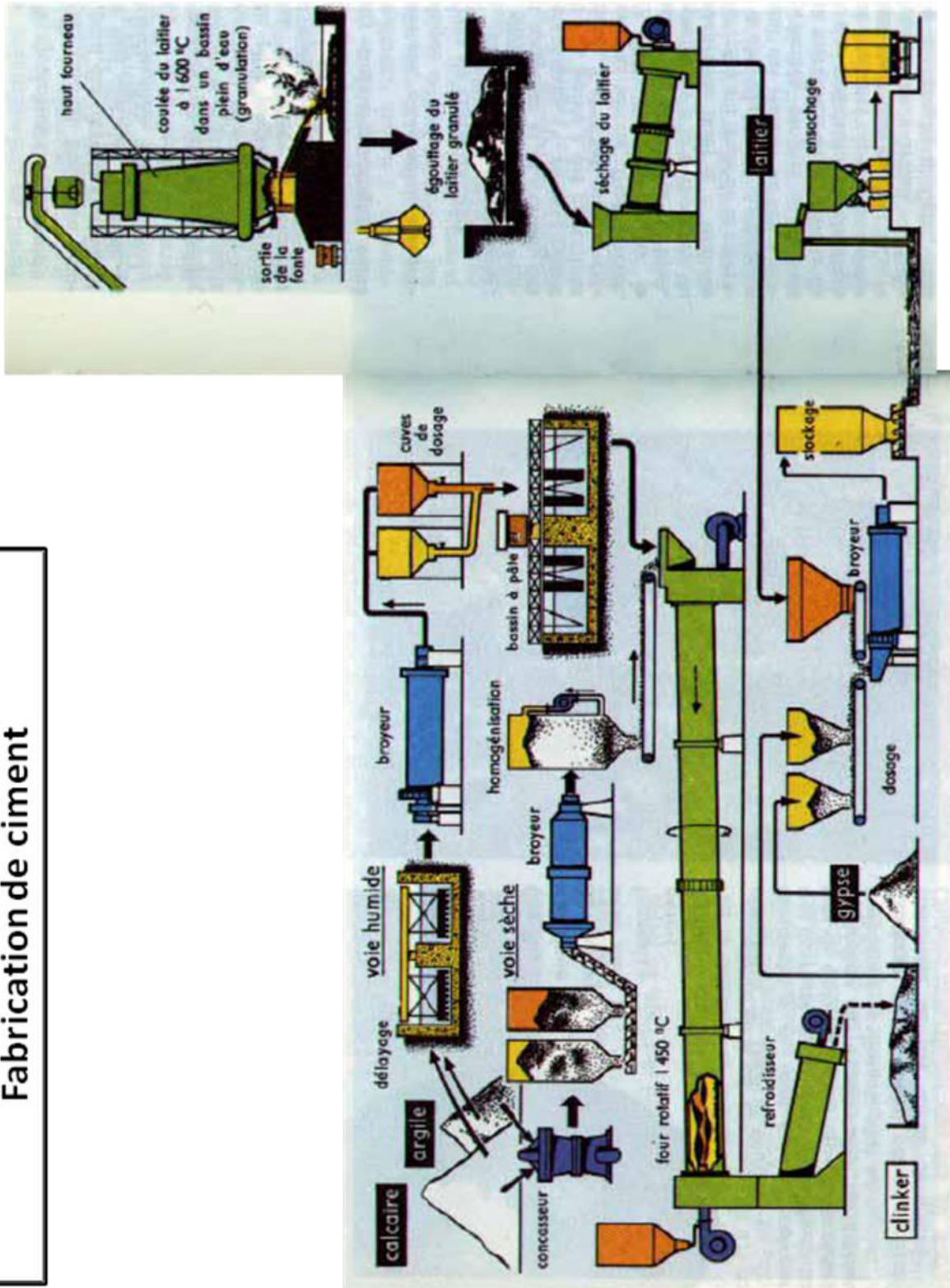
C'est le constituant de base du Ciment.

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

<https://www.youtube.com/watch?v=5jFXglOYNEU>



Fabrication de ciment



3-3-3- Ciments avec constituants secondaires :

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

a) Le laitier de haut fourneau (L):

Scorie de haut-fourneau refroidie brutalement dont la composition est voisine de celle de constituant de base ; il présente un phénomène de prise hydraulique favorisé par l'action catalysant de la chaux libérée à la cristallisation du clinker ; il confère au liant une résistance aux eaux agressives car il ne contient plus de chaux libre.

b) Les pouzzolanes (Z) : il faut distinguer

b)-1- pouzzolanes naturelles :

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

b)-2- Pouzzolanes artificielles :

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

La propriété essentielle de la pouzzolane est de fixer la chaux libérée à la cristallisation du clinker et de former avec l'eau un composé hydraté stable ; mélangée à du clinker. Elle empêche la chaux libérée à la prise de réagir à l'eau de mer et améliore la durabilité des ouvrages.

c) Les cendres volantes (C) :

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

On distingue deux sortes qui ont des propriétés pouzzolaniques :

c)-1- cendre de houille : résidu de la combustion de la houille pulvérisée (centrale thermique) qui se présente sous forme de matière minérale vitreuse (silice-alumine).

c)-2- cendre de lignite : résidu de la combustion du lignite pulvérisé à forte teneur en chaux qui nécessite une extinction avant utilisation en cimenterie.

d) Les Fillers :

Produit obtenu par broyage de certaines roches naturelles (calcaire, basalte,...) qui, grâce à une granulométrie appropriée, améliorent les propriétés physiques du ciment notamment :

L'accroissement de la maniabilité.

La diminution de la perméabilité et de la capillarité.

La réduction des fissures.

Ils peuvent être :

Inertes, s'ils n'ont, avec l'eau aucune action chimique sur le ciment.

Actifs, s'ils ont avec l'eau une action pouzzolanique ou hydraulique.

3-2-4 – Propriétés principales :

- **Hydratation** : les réactions qui se passent dès le début du gâchage et se poursuivent dans le temps sont extrêmement complexes.
- **Phase dormante** : où la pâte pure (ciment et eau) reste en apparence inchangée pendant un certain temps (de quelques minutes à quelques heures suivant la nature du ciment).
En fait, dès le malaxage, les premières réactions se produisent;
- **Début et fin de prise** : après une ou deux heures pour la plupart des ciments, on observe une augmentation brusque de la viscosité : c'est le début de prise, qui est accompagné d'un dégagement de chaleur. La fin de prise correspond au moment où la pâte cesse d'être déformable et se transforme en un matériau rigide mais sont ralenties grâce aux ajouts de gypse.
- **Durcissement** : on a l'habitude de considérer le durcissement comme la période qui suit la prise et pendant laquelle l'hydratation du ciment se poursuit. La résistance mécanique continue à croître très lentement; mais la résistance à 28 jours est la valeur conventionnelle.
- **Masse volumique apparente** : varie de 800 à 1300 kg/m³
(1kg/l) en moyenne.
 - **Masse volumique absolue** : varie de 2900 à 3150 kg/m³ suivant le type de ciment.
 - **Le retrait** : la mesure du gonflement dans l'eau et du retrait dans l'air est effectuée sur prisme 4x4x16 cm sur mortier normal. Le retrait limité à 0,8 mm/m pour les ciments CPA et CPJ de classe 45R et 55. Il n'est pas normalisé pour les autres ciments (CLK, CHF, CLC).
 - **L'expansion** : se mesure grâce aux aiguilles de Lechâtelier.

L'expansion ne doit pas être supérieure à 10 mm sur pâte pure pour tous les ciments.

- **Résistances mécaniques** : elles caractérisent de façon conventionnelle, la résistance du ciment rattachée à une classe de résistance définie par sa valeur nominale. Cette valeur est la moyenne M des deux limites nominales inférieure et supérieure ($M \pm 10$ MPa) de la résistance à la compression à 28 jours.

3-2-5 – Différentes catégories de ciment et Utilisations :

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

Il existe deux classifications :

L'ancienne classification (CPA 45, CPJ 35, ..),

La nouvelle classification (CEM I 32,5, CEM II 42,5, ..).

La nouvelle classification est en fait l'expression d'une intégration des productions françaises de ciment au contexte Européen, ainsi qu'une amélioration des performances des ciments. La classification CEM est en vigueur depuis 1996. L'ancienne classification est en œuvre en France depuis 1979.

En Afrique Francophone, l'ancienne classification (se référant aux normes NFP 15.300 et 301) reste jusqu'à présent la référence pour la classification des ciments. Nous ne parlerons donc que d'elle.

a) Le ciment Portland Artificiel (CPA) :

a)1) Composition : résulte du broyage du clinker et du sulfate de calcium (gypse ou anhydrite) pour régulariser la prise, et éventuellement de fillers en faible quantité (<3%). La teneur en clinker est au minimum 97%.

a)2) Caractéristiques garanties : Les résistances sont mesurées sur mortier normal; les valeurs minima. Garanties sont données comme suit :

Classe	Résistances minima garanties en MPa		
	2 jours	7 jours	28 jours
CPA 45	—	17,5	35
CPA 45 R	12	—	35
CPA 55	10	—	45
CPA 55 R	17	—	45
CPA HP	15	—	55
CPA HP R	22	—	55

Le retrait mesuré à 28 jours sur mortier normal doit être $< 800 \mu\text{m/m}$ pour la classe 45 et $1000 \mu\text{m/m}$ pour les autres. Les caractéristiques chimiques, qui sont un facteur important de la résistance des bétons à des ambiances agressives, concernant la teneur en anhydride sulfurique (SO_3) $< 4\%$, en magnésie (MgO) $< 5\%$ et en ions chlore $< 0,05\%$.

a)3) Domaines d'emploi principaux : Les CPA ordinaires conviennent pour des travaux de toute nature; béton armé ou béton précontraint.

Par contre, leurs caractéristiques n'en justifient pas l'emploi pour les travaux de maçonnerie courante et les bétons de grande masse ou faiblement armé.

Les CPA "Rapide", conviennent pour les mêmes travaux; mais permettent un décoffrage rapide, appréciable notamment en préfabrication.

Les CPA HP et HPR conviennent pour les travaux de B.A. et B.P. pour lesquels est recherchée une résistance exceptionnelle. Pour les travaux en milieu agressif (terrain gypseux, eaux de mer, eaux sulfatées), on emploie le ciment prise-Mer ou ciment résistant aux eaux sulfatées.

b) Le ciment Portland Composé (CPJ) :

b)1)Composition : résulte du mélange de clinker en quantité au moins égale à 65% et d'autres constituants tels que laitiers, cendres volantes, pouzzolanes ou fillers (un ou plusieurs) dont le total ne dépasse pas 35% .

b)2) Caractéristiques garanties : De même que pour les CPA, des résistances minimales variant avec les classes sont garanties à 2, 7 et 28 jours.

Classe	Résistances minima garanties en MPa		
	2 jours	7 jours	28 jours
CPJ 35	—	10,0	25
CPJ 45	—	17,5	35
CPJ 45R	12	—	35
CPJ 55	10	—	45
CPJ 55 R	17	—	45

Le retrait mesuré à 28 jours sur mortier normal doit être $< 800 \mu\text{m/m}$ pour les CPJ 35 et 45 et $1000 \mu\text{m/m}$ pour les autres. Les caractéristiques chimiques, qui sont un facteur important de la résistance des bétons à des ambiances agressives, concernant la teneur en anhydride sulfurique (SO_3) $< 4\%$ et en ions chlore $< 0,05\%$.

b)3) Domaines d'emploi principaux : Les CPJ 35 conviennent bien pour les travaux de maçonnerie et les bétons peu sollicités.

Les CPJ 45 et 55 conviennent pour les travaux de toute nature en béton armé ou précontraint. De façon générale, les CPJ sont bien adaptés pour les travaux massifs exigeant une élévation de température modérée, les routes et le béton manufacturé.

Les sous classe "R" (rapide) sera préférée pour les travaux exigeant de hautes résistances initiales (décoffrage rapide, préfabrication).

Lorsque l'aspect est important (béton apparent, enduits), il convient d'éviter l'emploi de certains CPJ contenant des proportions importantes de constituants susceptibles d'entraîner des variations de teinte trop marquées, notamment les cendres volantes.

c) Les ciments au laitier :

c)1) Composition : trois types de ciments comportent des pourcentages de laitier assez importants; il s'agit du ciment de laitier au clinker (CLK), du ciment au laitier et aux cendres (CLC), du ciment de Haut-fourneau (CHF).

c)2) Caractéristiques garanties : Ces ciments sont représentées dans toutes les classes à l'exception des sous-classes "R", compte tenu de leur vitesse de durcissement relativement lente.

Classe	Résistances minima garanties en MPa		
	2 jours	7 jours	28 jours
45	—	17,5	35
55	10	—	45
HP	15	—	55

La teneur en anhydride sulfurique (SO_3) < 5% pour le CLK et à 4% pour le CLC et le CHF.

c)3) Domaines d'emploi principaux : Ces ciments sont bien adaptés aux

- travaux hydrauliques, souterrains, fondations et injection,
- travaux en eaux agressives : eau de Mer, eaux séléniteuses, eaux industrielles, eaux pures,
- ouvrages massifs : fondations, piles d'ouvrages d'art, murs de soutènement, barrages.

Précautions particulières : Les bétons de ciment de laitier, sont sensibles à la dessiccation. Il faut les maintenir humides pendant le durcissement et pour cela, protéger au besoin leurs surfaces à l'aide de produits de cure; par conséquent, ces ciments sont à éviter pour les enduits.

L'aspect rêche du béton ne doit pas inciter à augmenter la teneur en eau.

Le ralentissement de la vitesse d'hydratation par le froid est plus marqué qu'avec le ciment Portland de même classe. A cet effet, l'emploi de ce type de ciment par temps froid est à éviter.

d) Les ciments à maçonner :

d)1) Composition : résultent d'un mélange à proportions variables de constituants de liants hydrauliques (clinker, laitier, pouzzolane,...etc) avec une proportion d'inertes ($< 50\%$). Le rapport de laitier doit être inférieur à 50% du poids des constituants actifs.

d)2) Caractéristiques garanties : il existe deux classes de résistance selon la résistance minimum à 28 jours.

Classe	Résistances minima garanties en MPa	
	7 jours	28 jours
CM 160	10	16
CM 250	16	25

Le temps de début de prise doit être supérieur à 30 mn.

L'expansion à chaud ne doit pas dépasser 3 mm. La teneur en SO_3 est limitée à 3,5%.

d)3) Domaines d'emploi principaux : Ces ciments dont les résistances sont volontairement limitées par rapport aux ciments classiques, conviennent bien pour la confection de mortiers utilisés dans les travaux de bâtiment (maçonnerie, enduits, crépis, etc.).

Ils peuvent également être employés pour la fabrication ou la reconstitution de pierres artificielles.

d)4) Précautions particulières : Ces ciments ne conviennent pas pour les bétons à contraintes élevées ou les bétons armés. Aussi, ils ne doivent pas être utilisés en milieux agressifs.

e) Le ciment prompt :

e)1) Composition : est obtenu par cuisson, à température modérée ($1000 \div 1200\text{ }^{\circ}\text{C}$) d'un calcaire argileux d'une grande régularité. La mouture est plus fine que celle des ciments Portland.

e)2) Caractéristiques : C'est un ciment à prise rapide, à faible retrait et à résistances élevées à très court terme. La résistance du mortier à 1 heure est de 6 MPa.

Résist.(MPa)	15'	1 h	3 h	1 j	7 j	28 j	6 m.	1 an
compression	4,0	6,0	8,0	10,0	14,0	19,0	40,0	45,0
flexion	1,4	1,8	2,3	2,5	3,0	3,5	5,0	5,5

Le début de prise commence à env. 2 min. et s'achève pratiquement à 4 min. Le retrait à 28 jours est de l'ordre de 400 μ m/m. Le ciment prompt est résistant aux eaux agressives (eaux séléniteuses, eaux pures, eaux acides) et est agréé "prise mer".

e)3) Domaines d'emploi principaux : Le ciment prompt s'utilise en mortier avec un dosage généralement de deux volumes de ciment pour un volume de sable et aussi en béton. Dans les cas d'urgence nécessitant une prise immédiate (aveuglements de voie d'eau), il est possible de l'employer en pâte pure.

Parmi les nombreux emplois, on peut citer :

- scellements, bétons projetés, moulages,
- enduits de façade (en mélange aux chaux naturelles),
- revêtements et enduits résistants aux eaux agressives et aux déjections (bâtiments pour l'élevage, silos),
- colmatage, travaux souterrains et travaux à la Mer.

e)4) Précautions particulières : éviter particulièrement l'excès d'eau.

f) Le ciment alumineux fondu :

f)1) Composition : résulte de la cuisson jusqu'à fusion d'un mélange de calcaire et de bauxite, suivie d'une mouture sans gypse à une finesse comparable à celle des CPA.

f)2) Caractéristiques garanties : les résistances minimales sur mortier normal sont les suivantes :

Résistance (MPa)	6 h	24 h	28 j
compression	30	50	65
flexion	4	5,5	6,5

Début de prise : minimum 1h30. Le ciment fondu développe des résistances à court terme élevées grâce à un durcissement rapide.

Il est très résistant aux milieux agressifs et acides (jusqu'à des pH de l'ordre de 4). Une chaleur d'hydratation élevée, liée à son durcissement rapide, permet au ciment fondu d'être mis en œuvre par temps froid (jusqu'à 10 °C). C'est également un ciment réfractaire (bon comportement jusqu'à 1300 °C),

f)3) Domaines d'emploi principaux : Le ciment fondu est particulièrement adapté aux domaines suivants :

- travaux nécessitant l'obtention, dans un délai très court, de résistances mécaniques élevées (poutres et linteaux pour le bâtiment, sols industriels, etc.),
- sols résistants aux chocs, à la corrosion et aux forts trafics,
- ouvrages en milieux agricoles : canalisations, assainissement,
- fours, cheminées (bétons réfractaires),
- travaux de réparation, scellements (en mélange avec le ciment

Portland pour la préparation de mortiers à prise réglable).

Précautions particulières : Par temps très froid, il faut protéger le béton jusqu'au déclenchement de la phase de durcissement. Dans tous les cas, le mortier ou le béton de fondu doit être maintenu humide (produit de cure ou protection), pendant toute sa période de durcissement pour éviter sa dessiccation.

Le dosage minimum en ciment fondu est généralement de 400 kg/m³ de béton, le rapport eau/ciment ne doit pas dépasser 0,4.

g) Les ciments blancs :

g)1) Composition et caractéristiques : la teinte blanche est obtenue grâce à des matières premières très pures (calcaire et Kaolin) débarrassées de toute trace d'oxyde de fer. Les caractéristiques sont analogues à celles des ciments Portland gris.

g)2) Domaines d'emploi principaux : Grâce à sa blancheur, le ciment blanc permet la mise en valeur des teintes des granulats dans les bétons apparents.

La pâte peut être elle même colorée à l'aide de pigments minéraux, ce qui fournit des bétons avec une grande variété de teintes tant pour les bétons de structure que pour les bétons architectoniques et les enduits décoratifs.

La composition du béton doit être bien étudiée en fonction des granulats et des effets recherchés.

Chapitre 4

LES MORTIERS

Chapitre 4 : Mortiers

4-1 –Introduction :

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

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

La durée de malaxage doit être optimum, afin d'obtenir un mélange homogène et régulier.

Les mortiers peuvent être: préparés sur le chantier en dosant et en mélangeant les différents constituants y compris les adjuvants. préparés sur le chantier à partir de mortiers industriels secs prédosés et avant l'utilisation, il suffit d'ajouter la quantité d'eau nécessaire livrée par une centrale: ce sont des mortiers prêts à l'emploi.

Les mortiers industriels se sont beaucoup développés ces dernières années; permettant d'éviter le stockage et le mélange des constituants sur des chantiers.

4-2–Composition :

Le mortier est un des matériaux de construction, qui contient du ciment; de l'eau; du sable; des adjuvants et éventuellement des additions. Ils peuvent être très différents les uns des autres selon la nature et les pourcentages des constituants, le malaxage, la mise en œuvre et la cure.

Les mortiers sont constitués par des mélanges de: liant (ciment ou chaux) ,eau ,sable , adjuvant.

a) Les liants:

Généralement, on peut utiliser:

- les ciments normalisés (gris ou blanc);
- les ciments spéciaux (alumineux fondu, prompt, ..)
- les liants à maçonner;
- les chaux hydrauliques naturelles;
- les chaux éteintes

b) Les sables:

Chapitre 4 : Mortiers

Normalement, les sables utilisés sont les sables appelés “sable normalisé”. Les sables de bonne granulométrie doivent 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.

Ils peuvent être:

- naturels et roulés (de rivières, de sablières, ..), de nature siliceuse ou silico-calcaire;
- naturels concassés (roches de carrières), comme des basaltes, porphyres, quartzites. Ils sont anguleux et durs.
- spéciaux (lourds, réfractaires, légers): sable de laitier; sable d'oxydes de fer, de chromite; sable de briques concassées;

Certains sables sont à éviter, généralement les 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.

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.

c) 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 entraîneurs d'air;
- les modificateurs de prise (retardateurs, accélérateurs);
- les hydrofuges.

Dans tous les cas des soins particuliers doivent être pris afin d'obtenir des mortiers sans ressuage, homogènes d'une gâchée à l'autre.

d) Les ajouts:

Chapitre 4 : Mortiers

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

- poudres fines pouzzolaniques (cendres, fumée de silice..);
- fibres de différentes natures;
- colorants (naturels ou synthétiques);
- polymères.

4-3- Les différents mortiers :

Dans les travaux publics on utilise différents types de mortier:

a) 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.

b) Les mortiers de chaux :

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

c) Les mortiers bâtards :

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

4-3-1- Mortiers fabriqués sur chantier :

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

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

4-3-2- Mortier industriel :

Ce sont des mortiers que l'on fabrique à partir de constituants secs, bien sélectionnés, conditionnés en sacs, contrôlés en usine et parfaitement réguliers. Pour utiliser ce type de

Chapitre 4 : Mortiers

mortiers, il suffit de mettre la quantité d'eau nécessaire et malaxer pour ensuite les mettre en œuvre.

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

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

- mortiers pour enduits de couleur et d'aspect varié,
- mortiers d'imperméabilisation,
- mortier d'isolation thermique,
- mortier de jointoiement,
- mortier de ragréage,
- mortier de scellement, mortier pour chapes, mortier-colle pour carrelages, sur fond de plâtre ou de ciment, etc.,
- mortier de réparation.

4-4- Caractéristiques principales :

Les caractéristiques principales des mortiers sont:

- ouvrabilité;
- prise;
- résistances mécaniques;
- retraits et gonflements, etc.

Pour pouvoir évaluer les caractéristiques des mortiers on prend souvent comme référence le mortier 1/3 composé en poids de: une partie de ciment et de 3 parties de sable normalisé dont les grains s'échelonnent de 80 microns à 2 mm et passent dans un fuseau bien déterminé et 0,45 partie d'eau.

Ce mortier est malaxé et mis en place dans des moules métalliques suivant des méthodes normalisées. On fait sur ce mortier des essais rhéologiques et éventuellement la prise et la chaleur d'hydratation. Beaucoup d'essais de laboratoires se font sur les prismes de 4 x 4 x 16 cm (résistances mécaniques, retrait, gonflement, absorption capillaire, résistances au gel et aux eaux agressives).

Chapitre 4 : Mortiers

4-4-1- Ouvrabilité :

L'ouvrabilité d'un mortier se mesure à l'aide de divers appareils. Les plus connus sont:

a) **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:

$$E\% = 100 \frac{D_r - D_i}{D_i}$$

Avec D_r = diamètre final et D_i = diamètre initial.

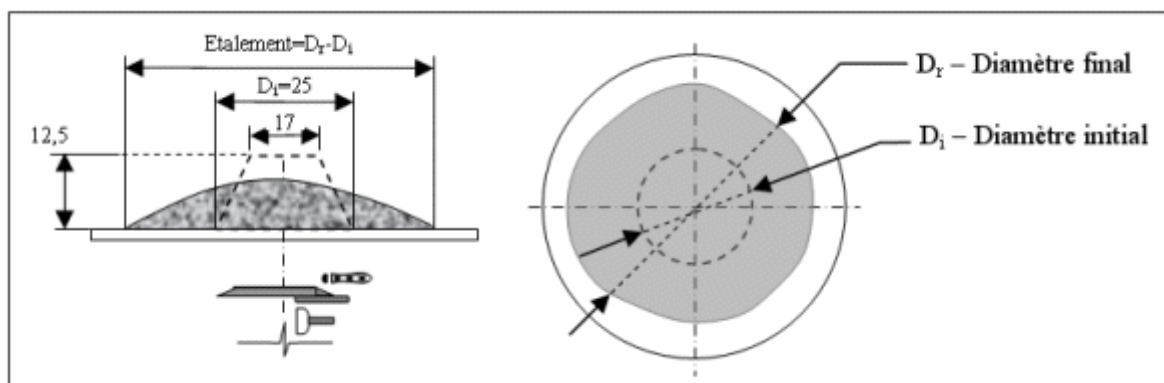


Fig.1-Table à secousses

b) **Le maniabilimètre du LCPC:** il est constitué d'un moule parallélépipédique comportant une paroi mobile et un vibreur. Le principe de l'essai consiste, après avoir enlevé la paroi mobile, à mesurer le temps mis par le mortier sous vibrations pour atteindre un repère gravé sur la face intérieure du moule.

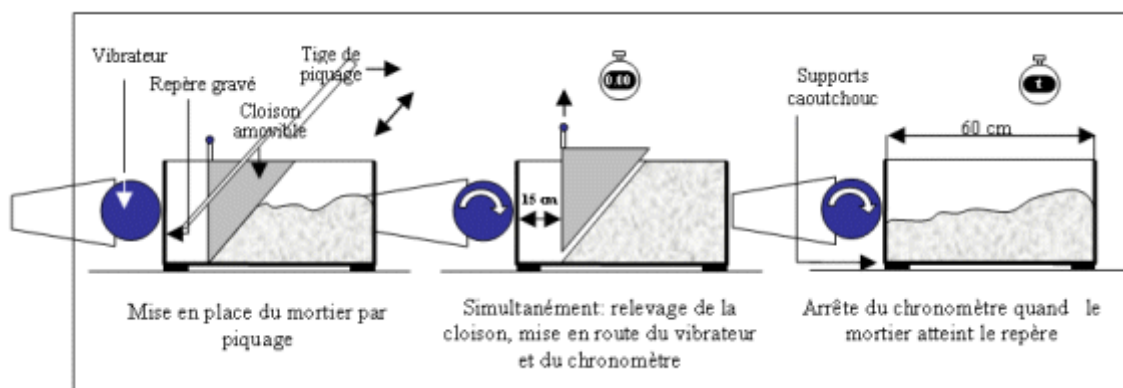


Fig.2- Principe de fonctionnement du maniabilimètre

Chapitre 4 : Mortiers

c) **Le cône:** dans le cas d'un mortier fluide, on peut mesurer le temps d'écoulement d'une certaine quantité de mortier au travers d'un ajustage calibré situé à la partie inférieure d'un cône. Le cône peut aussi être muni d'un vibreur.

4-4-2- Prise :

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). Il est possible d'obtenir (hors norme) le temps de prise d'un mortier avec le même appareillage 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.

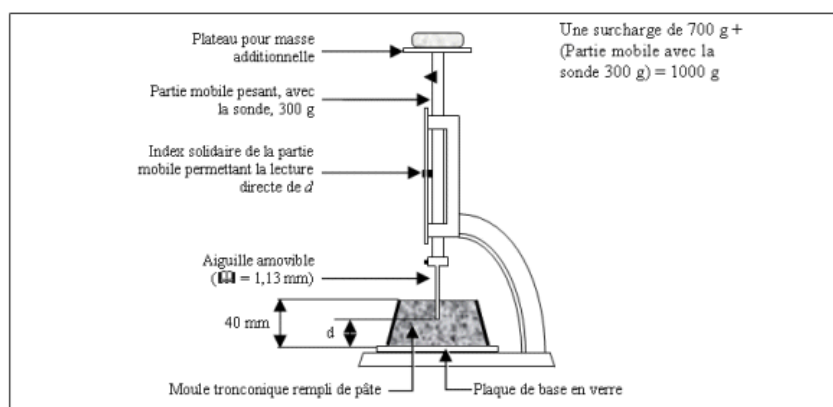


Fig. 3: Appareil de Vicat muni de l'aiguille avec une surcharge

4-4-3- Résistances mécaniques :

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

Chapitre 4 : Mortiers

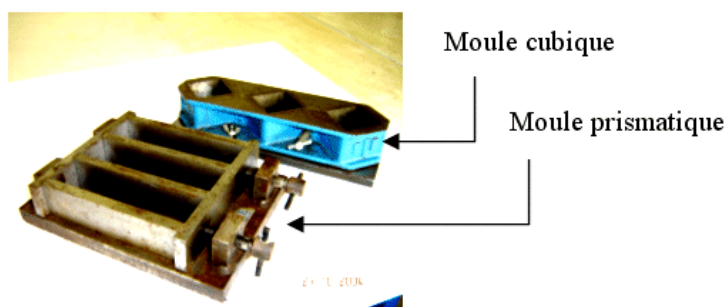


Fig. 4- Moule pour moulage des éprouvettes de mortier

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).

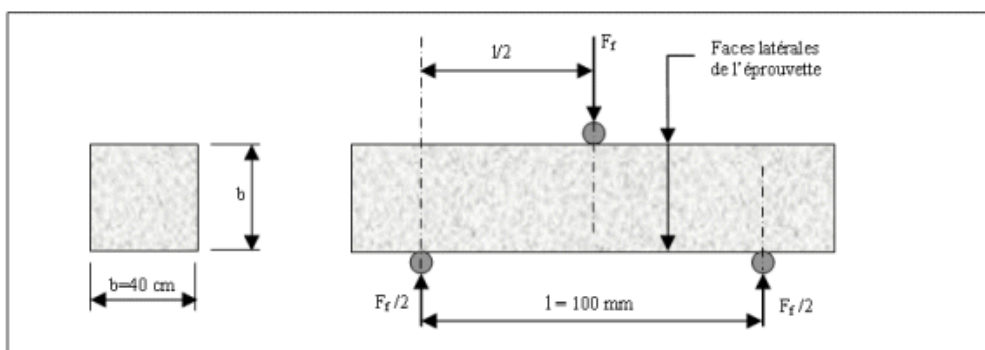


Fig.5 - Dispositif pour l'essai de résistance à la flexion

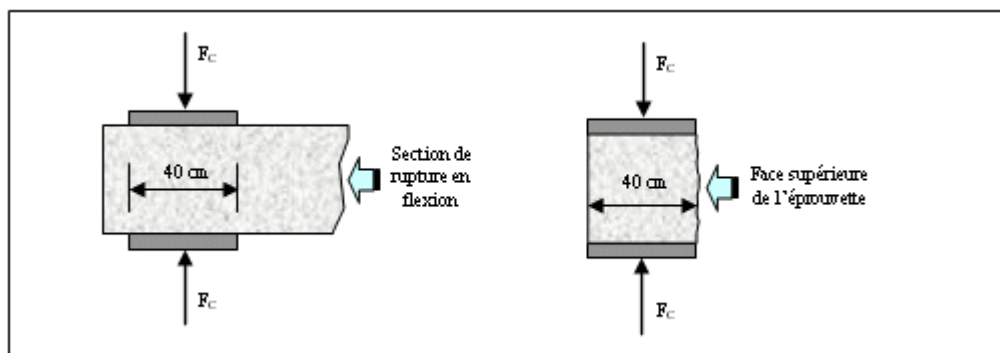


Fig. 6 - Dispositif de rupture en compression.

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

- nature et dosage en ciment;
- rapport C/E;
- granulométrie et nature du sable;

Chapitre 4 : Mortiers

- énergie de malaxage et mise en oeuvre;
- protection les tous premiers jours.

4-4-4-Retraits et gonflements :

Les retraits se mesurent sur des prismes 4 x 4 x 16 cm en mortier 1/3, munis de plots à leurs extrémités et conservés, après démoulage, dans salle à 20 °C et à 50 % d'humidité relative. Ce retrait progresse à peu près comme le logarithme entre 1 et 28 jours.

PARTIE B

TRAVAUX PRATIQUES

MESURE DE LA MASSE VOLUMIQUE DES GRAINS

I-1) BUT DE L'ESSAI:

Cet essai permet de déterminer la masse volumique absolue d'un corps (sable, ciment, gravier etc...), c'est-à-dire la masse en t (tonne), de ce corps pour 1m^3 de volume mais uniquement la masse des différents grains constituant le granulat, on ne tient pas compte des vides situés entre les grains. Cette masse volumique est notée ρ_{abs} .

I-2) DEFINITION

La masse volumique absolue ρ_{abs} est la masse par unité de volume de la matière qui constitue le granulat, sans tenir compte des vides pouvant exister dans ou entre des grains. Elle est exprimée en t/m^3 , en g/cm^3

I-3) PRINCIPE:

Le volume de grains solides de sol est mesuré par la pesée du volume d'eau déplacé lorsqu'on introduit les grains solides dans le récipient. Le poids du sol est obtenu par une pesée préalable.

On aura:

$$\rho_{\text{abs}} = \frac{M_s}{V_s} \quad \text{I-1}$$

Où

M_s est la masse des grains solides

V_s Volume des grains solides

La mesure de la masse volumique ρ_{abs} d'un sol en laboratoire se fait par deux méthodes:

- 1- Méthode de l'éprouvette graduée
- 2- Méthode du ballon

I-3-1) Conduite de l'essai par la méthode de l'éprouvette graduée

TP n°1 Mesure de la masse volumique absolue des grains

Pour cet essai on utilise le matériel suivant:

- une éprouvette graduée
- une balance

Cette méthode est très simple et très rapide. Toutefois sa précision est faible.

1. Remplir une éprouvette graduée avec un volume V_1 d'eau.
2. Peser un échantillon sec M de granulats (300 g) et l'introduire dans l'éprouvette en prenant soin d'éliminer toutes les bulles d'air.
3. Lire le nouveau volume V_2 .

Es différentes opérations sont schématisées dans la figure 1

- La masse volumique absolue est $\rho_{abs} = \frac{M}{V_2 - V_1}$

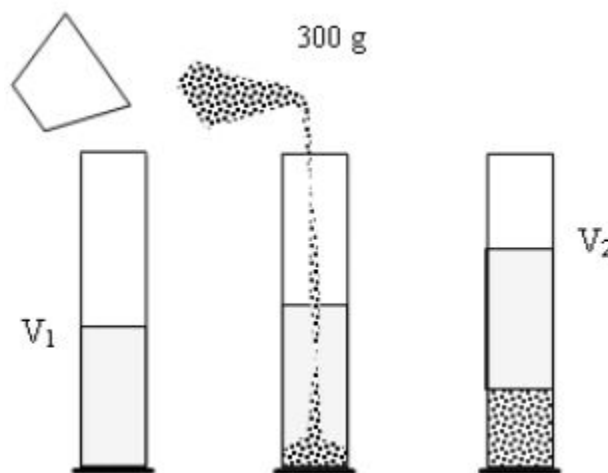


Figure I-1 : Eprouvettes

Généralement on reporte dans un tableau les mesures suivantes: V_1 , V_2 et M et on calcule

ρ_{abs} par la formule

V_1	V_2	M	ρ_{abs}

TP n°1 Mesure de la masse volumique absolue des grains

I-3-2) Conduite de l'essai par la méthode du ballon

Cette méthode de détermination des masses volumiques est plus précise à condition de prendre un certain nombre de précautions.

- Déterminer avec précision la masse m_1 du ballon rempli d'eau.
- Déterminer avec précision la masse m_2 d'un échantillon de matériau sec .
- Introduire la totalité du matériau dans le ballon, remplir d'eau. Vérifier qu'il n'y a aucune bulle d'air. Peser alors avec précision le ballon, soit m_3 .

La masse volumique absolue est alors :

$$\rho_{abs} = \frac{m_2}{(m_1 + m_2) - m_3} \quad \text{I-2}$$

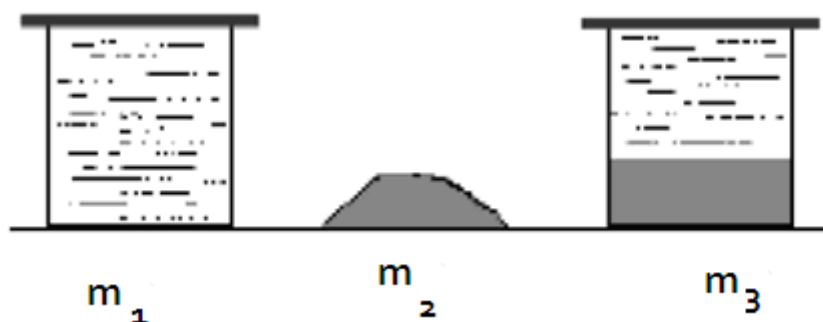


Figure I-2 Pesées des ballons

Généralement on reporte dans un tableau les mesures suivantes: m_1 , m_2 et m_3 et on calcule

ρ_{abs} par la formule

m₁	m₂	m₃	ρ_{abs}

MESURE DE LA MASSE VOLUMIQUE APPARENTE

II-1) BUT DE L'ESSAI:

Cet essai permet de déterminer la masse volumique apparente d'un corps (sable, ciment, gravier etc...), c'est-à-dire la masse en tonne (t) de ce corps pour 1m³ de volume. Cette masse volumique apparente est appelée ρ .

II-2) DEFINITION

La masse volumique apparente est la masse par unité de volume exprimée en t/m³, en kg/dm³, ou en g/cm³ (rappel 1 t/m³ = 1 g/cm³). Cette masse volumique intègre les grains de l'agrégat ainsi que les vides compris entre ces grains.

De ce fait il ne faut pas confondre avec la masse volumique absolue, qui elle ne tient pas compte que de la masse des grains constituant le matériau sans les vides pouvant exister dans ou entre des grains.

II-3) PRINCIPE:

Il suffit de remplir un récipient, dont on connaît le volume, en prenant de grandes précautions pour éviter tous les phénomènes parasites que pouvait provoquer le tassement, en effet un tassement trop important ou trop faible donnerait des résultats erronés. Pour limiter ce risque d'erreurs, l'essai se fera sur plusieurs pesées (généralement 5 pesées), avec lesquelles on fera la moyenne. On pèse l'échantillon en prenant le soin de déduire la masse du récipient. Enfin, la masse de l'échantillon est divisée par le volume du récipient. Le résultat final nous donne la valeur de la masse volumique apparente du matériau

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

II-1

Où

ρ Masse volumique apparente

M est la masse du matériau étudié (t;kg, g)

V Volume du récipient (m^3 , dm^3 , cm^3)

Matériels utilisés

Cet essai nécessite peu de matériel:

- Un récipient (en bois ou en métal) de forme cubique ou prismatique
- Une balance
- Une règle pour arasement du récipient

Conduite de l'essai:

- 1- Prendre un récipient et calculer son volume,
- 2- Peser ce récipient et noter sa masse,
- 3- Prendre le matériau dans les mains en formant un entonnoir,
- 4- Placer les deux mains à environ 10 cm au dessus du récipient et laisser le sable s'écouler ni trop vite, ni trop lentement.

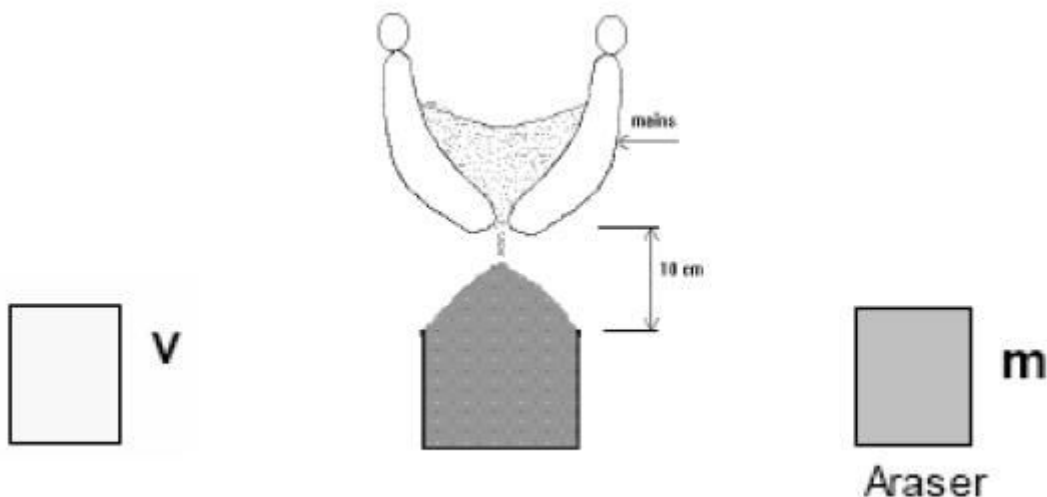


Figure II-1 : Conduite de l'essai

- 5- Laisser couler le matériau toujours au centre du récipient, jusqu'à ce qu'il déborde tout autour du récipient en formant un cône (talus naturel).
- 6- Araser à la règle avec précaution la partie supérieure du matériau dépassant des bords supérieurs du récipient,

TP n°2 Mesure de la masse volumique apparente

7- Peser l'ensemble et noter le résultat,

8- Recommencer l'opération 5 fois et noter les résultats dans un tableau. Pour obtenir la masse volumique apparente, faire la moyenne.

Pesées	M_0	M_1	M_2	V	ρ_{app}
1					
2					
3					
4					
5					
Masse volumique apparente=					Moyenne

M_0 : Masse du récipient

M_1 : Masse de l'échantillon avec le récipient

M_2 : Masse de l'échantillon seul ($M_2 = M_1 - M_0$)

V : Volume du récipient

ρ_{app} : Masse volumique apparente ($\rho_{app} = M/V$)

TENEUR EN EAU D'UN GRANULAT**III-1) BUT DE L'ESSAI:**

Cet essai permet de déterminer la masse d'eau interstitielle (eau située entre les grains du granulat) contenu par le granulat par rapport au matériau sec. On appelle cette valeur ω (oméga). Cette valeur a une grande importance, car celle-ci découle la quantité d'eau d'apport (eau introduite dans le malaxeur), nécessaire au moment du gâchage.

III-2) PRINCIPE:

Après prélèvement d'une masse d'échantillon, il sera pesé tel que. Ensuite, il sera séché et repesé. On obtiendra la valeur de la teneur en eau en divisant par la masse sèche la différence humide et la masse sèche, le tout multiplié par 100 pour obtenir un pourcentage. On pourra effectuer deux pesées pour en faire la moyenne afin d'obtenir un résultat juste.

$$\omega = \frac{M_h - M_s}{M_s} \times 100 \text{ en \%} \quad \text{III-1}$$

Où

M_s est la masse du matériau sec

M_h est la masse du matériau humide

Trois méthodes peuvent être utilisées pour la mesure de la teneur en eau in situ et/ou au laboratoire qui sont:

- Flambage à l'alcool à brûler,
- Emploi du carbure de calcium,
- Séchage au four.

Matériels utilisés

Cet essai nécessite peu de matériel:

Coupelle	M_0	Pesée 1	M_h	Pesée 2	M_s	ω	$\overline{\omega}$
1							
2							

TP n°3 Teneur en eau

M_0 : Masse des coupelles

M_h : Masse du sable humide

M_s : Masse du sable sèche

ω teneur en eau en pourcentage

$\bar{\omega}$ moyenne de la teneur en eau des deux pesées en pourcentage

ANALYSE GRANULOMETRIQUE

Avant d'entamer les procédures de l'essai; nous présentons quelques définitions de certains granulats

VI-1) DEFINITIONS**VI-1-1) Gravier :**

Le gravier est produit par l'altération et l'érosion des roches. Les cours d'eau (*voir* Fleuves et rivières) à courant violent et les glaciers peuvent le transporter sur de longues distances avant qu'il se dépose. Les fragments transportés par l'eau sont usés et arrondis, tandis que ceux qui ont été transportés par la glace ont des bords anguleux et tranchants. D'autre part, la taille des graviers transportés par les cours d'eau varie moins que celle de ceux qui sont transportés par les glaciers. On trouve également du gravier sur les plages soumises à l'action de vagues puissantes. Les graviers de plage sont très ronds et lisses.

VI-1-2) Sable :

Le sable provient de l'érosion et de l'altération de roches riches en quartz (granites, gneiss) sous l'action de processus physiques (vent, eaux courantes) ou chimiques (action dissolvante de l'eau). Les grains de sable qui se forment sont généralement gros et anguleux, difficilement transportables par le vent et les cours d'eau. Les plus gros grains de sable se retrouvent ainsi le long des cours d'eau, aux bords des mers, ou dans les régions désertiques.

En milieu fluvial, les grains s'usent peu et restent donc gros et anguleux. En milieu continental, l'usure des grains de sable par le vent et l'eau entraîne une modification de leur forme (ou morpho scopie) au cours des temps géologiques : les grains de sable usés deviennent émoussés et luisants (milieu littoral), ou ronds et mats (milieu éolien). En s'arrondissant, les grains deviennent plus petits. Les sables peuvent également se consolider et se cimenter ultérieurement pour donner naissance à des grès (grès quartzeux, grès calcaires)

VI-1-3) Ciment :

Pendant la préhistoire et au début de l'Antiquité, on utilisait l'argile comme liant pour maçonner les pierres. Lors de la construction des pyramides, les Égyptiens utilisèrent un

TP n°4 Analyse granulométrique

plâtre obtenu par cuisson d'un gypse. Plus tard, les Grecs, puis les Romains, se servirent de la chaux produite par la cuisson du calcaire, dans leurs constructions. À partir du 1^{er} siècle av. J.-C., ils améliorèrent le liant en y ajoutant des pouzzolanes, particules très fines d'origine naturelle, comme les cendres volcaniques, ou artificielles, comme la poussière de briques broyées. Ils obtinrent ainsi le ciment romain. Ce liant fut utilisé sans grandes modifications jusqu'en 1756, date à laquelle l'Anglais Smeaton, lors de la construction du phare d'Eddy Stone, mélangea des chaux hydrauliques et des pouzzolanes. Il obtint ainsi le premier liant artificiel, avec lequel il prépara un mortier aussi dur que la pierre de Portland.

En 1817, l'ingénieur français Louis Vicat, suivi, au début des années 1820, par Treussart, ainsi que par Pavin de Lafarge, découvrit et définît les formules des ciments actuels, préparés alors dans des fours verticaux. Les fours rotatifs firent leur apparition vers 1880 et sont toujours utilisés. À l'heure actuelle, les cimentiers, qui sont généralement équipés de laboratoires de recherche, cherchent à mettre au point des ciments de plus en plus performants. Le dernier-né a été inventé en 1908 : il s'agit du ciment alumineux.

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. Le matériau étudié est placé en partie supérieure des tamis et les classements des grains s'obtiennent par vibration de la colonne de tamis, pendant cinq minutes pour le sable et sept minutes pour le gravier puis on prélève les différents refus de chaque tamis et on les pèse.

VI-2) INTRODUCTION:

L'analyse granulométrique est l'opération qui consiste à étudier la répartition des différents grains d'un échantillon, en fonction de leurs caractéristiques (poids, taille, etc). Habituellement, l'analyse granulométrique fournit les proportions de grains de différents diamètres ; cette analyse peut se faire aussi bien par tamisage que par sédimentation dans l'eau en application de la loi de Stokes.

En fonction de la dimension et du nombre des grains composant un granulat, on dénomme les granulats, fines, sables, gravillons ou caillou. Cependant, pour un granulat donné, tous les grains qui le constituent n'ont pas tous la même dimension.

Pour cela, on procède au classement des grains sur une série de tamis emboîtés les uns dans les autres. Les dimensions des mailles des tamis sont décroissantes du haut vers le bas. Le granulat est placé sur le tamis le plus haut et par vibrations, on répartit les grains sur les différents tamis selon leur grosseur.

VI-3) DEFINITIONS:

- a) **Granularité:** Distribution dimensionnelle des grains (état). Granulométrie: Etude de la granularité.
- b) **Tamisât:** Partie de l'échantillon passé à travers les mailles du tamis.
- c) **Refus:** Partie de l'échantillon qui n'est pas passée à travers les mailles du tamis.
- d) **Refus cumulé:** C'est la somme de tous les refus, celui du tamis lui même plus tous les refus des tamis de maille plus grande. Il peut être exprimé en gramme ou en % de refus cumulés

VI-4) But du TP :

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

Détermination de coefficient d'uniformité C_U et coefficient de courbure C_C .

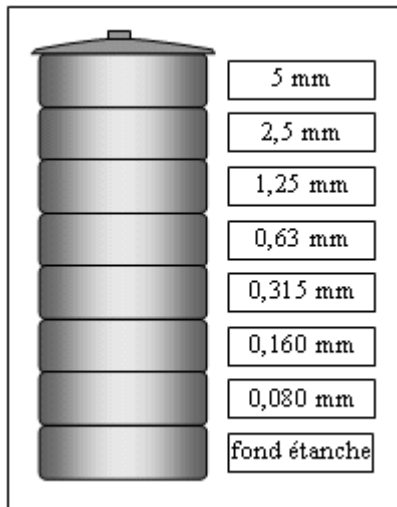
VI-4-1) Principe d'essai:

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. Le matériau étudié est placé en partie supérieure des tamis et les classements des grains s'obtiennent par vibration de la colonne des tamis.

VI-4-2) Matériel utilisé

Ce sont des tamis qui sont constitués d'un maillage métallique dont les ouvertures carrées, de dimension normalisée. La dimension des tamis est donnée par l'ouverture de la maille, c'est à dire par l'ouverture carrée, elles vont de 0,08 (Module 20) à 80 mm (Module 50). Il est également conseillé, dans la mesure du possible d'utiliser une machine à tamiser électrique, ce qui permet des résultats plus fiables.

TP n°4 Analyse granulométrique



Colonne de Tamis



Tamiseur Vibratoire

Le tableau suivant donne les différents tamis et les modules correspondants

Modules	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Tamis	0.08	0.100	0.125	0.16	0.200	0.250	0.315	0.40	0.50	0.63	0.80
Modules	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41
Tamis	1.00	1.25	1.60	2.00	2.50	3.15	4.00	5.00	6.3	8	10
Modules	42	43	44	45	46	47	48	49	50		
Tamis	12.5	16	20	25	31.5	40	50	63	80		

Cet essai est applicable à des granulats non souillés par une fraction argileuse significative. Il est impératif de prendre toutes les précautions nécessaires afin de ne pas perdre les éléments fins présents dans l'échantillon.

VI-4-3) Matériaux Utilisés:

1- sable.

2- gravier.

VI-4-4) Preparation Des Echantillons:

La quantité à utiliser doit répondre à différents impératifs qui sont :

- Il faut une quantité assez grande pour que l'échantillon soit représentatif.

- Il faut une quantité assez faible pour que la durée de l'essai soit acceptable et que les tamis ne soient pas saturés et donc inopérants.

Dans la pratique, la masse à utiliser sera telle que : $M = 0,2 D$ avec M, masse de l'échantillon en Kg et D diamètre du plus gros granulat exprimé en mm.

Dimensions des tamis à utiliser :

Pour les sables, on utilise en général les tamis de modules 20, 23, 26, 29, 32, 35, 38

Pour les matériaux plus grossiers tous les tamis au-delà du module 38 sont utilisés.

Description de l'essai:

- Le matériau sera séché à l'étuve à une température maximale de 105 °C.
- Les tamis sont emboîtés sur un fond étanche les uns sur les autres, dans un ordre croissant du bas de la colonne vers le haut.
- Le matériau est versé en haut de la colonne.
- Un couvercle ferme l'ensemble et permet d'éviter toute perte durant le tamissage.
- La colonne est fixée sur une tamiseuse électrique (on peut aussi effectuer la vibration manuellement)
- Le temps de tamisage varie suivant le matériel utilisé et dépend également de la charge de matériau présente sur le tamis et son ouverture. Un étalonnage de la machine est donc nécessaire. On considère que le tamisage est terminé lorsque les refus ne varient pas de plus de 1 % entre deux séquences de vibrations de la tamiseuse d'environ 1 minute..

Le refus du tamis ayant la plus grande maille est pesé. Soit R_1 la masse de ce refus.

Le refus du tamis immédiatement inférieur est pesé avec le refus précédent. Soit R_2 la masse du deuxième refus. Cette opération est poursuivie pour tous les tamis pris dans l'ordre des ouvertures décroissantes. Ceci permet de connaître la masse des refus cumulés R_n aux différents niveaux de la colonne de tamis. Le tamisât présent sur le fond de la colonne dut amis est également pesé.

La somme des refus cumulés mesurés sur les différents tamis et du tamisât sur le fond (fillers) doit coïncider avec le poids de l'échantillon introduit en tête de colonne.

VI-4-4) Résultats:

Les résultats seront présentés sous forme de tableau et se traduiront en courbe granulométrique en portant les ouvertures des tamis en abscisse sur une échelle logarithmique et les pourcentages en ordonnée sur une échelle arithmétique. La courbe est tracée d'une manière continue et peut ne passer rigoureusement par tous les points.

Remarque : Les courbes granulométriques peuvent être continues, et dans ce cas tous les tamis enregistrent un refus, ou bien elles peuvent être considérées discontinues lorsque plus de trois tamis consécutifs ne gardent pas de refus.

1-Sable:

<u>Ouverture de passoire en mm</u>	<u>Refus en gramme</u>	<u>Tamisât en gramme</u>	<u>Tamisât cumulé(%)</u>
<u>5</u>			
<u>2.5</u>			
<u>1.250</u>			
<u>0.630</u>			
<u>0.315</u>			
<u>0.160</u>			
<u>fond</u>			
<u>total</u>			

Calcul des coefficients :

$$C_u = D_{60}/D_{10} \longrightarrow \text{formule de HAZEN}$$

$$C_C = D_{30}^2 / D_{10} * D_{60} \longrightarrow \text{COEFFICIENT DE CORBURE}$$

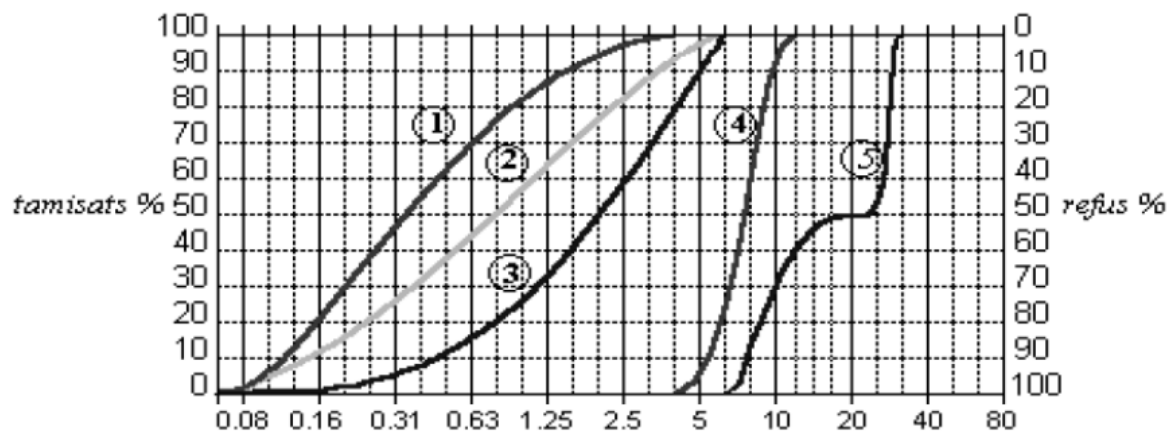
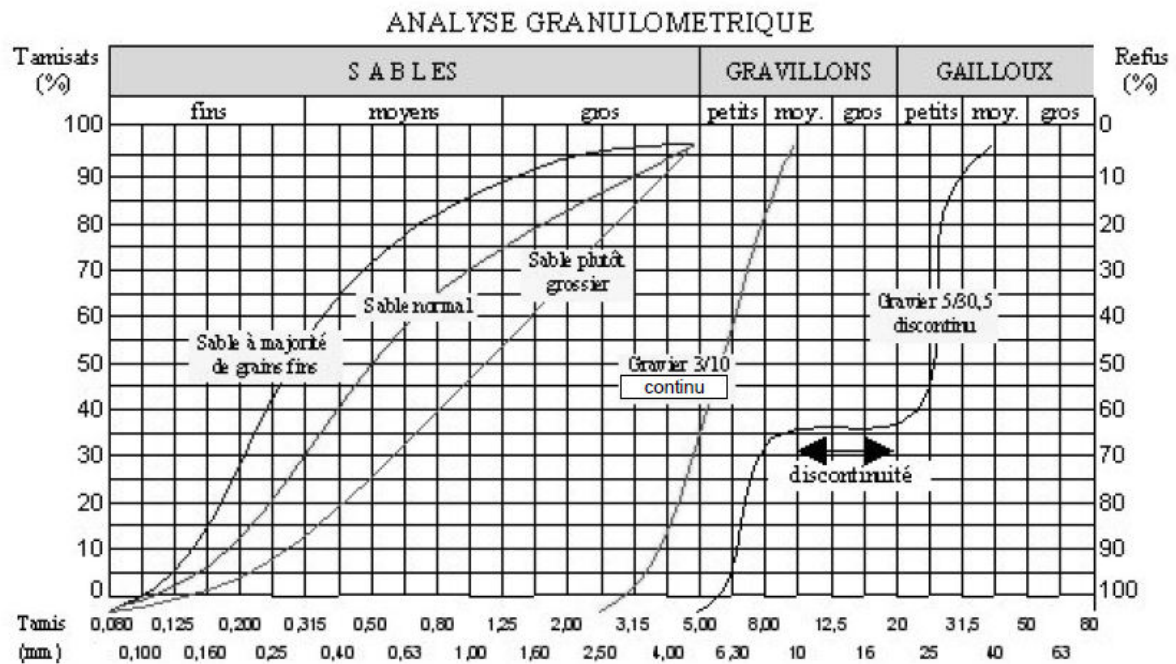
2-Gravier:

Ouverture de passoire	Refus en gramme	Tamisât en gramme	Tamisât cumulé (%)
25			
20			
16			
10			
8			
5			
Fond			

Sable: $D_{10} = \dots \text{ mm}$ $C_u = \dots$ $D_{30} = \dots \text{ mm}$ $D_{60} = \dots \text{ mm}$ $C_c = \dots$ **Gravier:** $D_{10} = \dots \text{ mm}$ $C_u = \dots$ $D_{30} = \dots \text{ mm}$ $D_{60} = \dots \text{ mm}$ $C_c = \dots$

NB : les Diamètres seront déterminés à partir de la courbe granulométrique.

Exemple d'une courbe fait par un étudiant



EQUIVALANT DE SABLE

V-L'équivalent de sable:

La propreté des granulats peut s'apprécier de différentes façons telles que l'essai au bleu de méthylène, d'équivalent de sable à 10 % de fines etc., mais dans ce travail pratique, on va parler que sur l'essai d'équivalent de sable.

Il s'agit là aussi d'une expérience normalisée dont chaque carrier doit pouvoir fournir les résultats pour ses sables. Elle permet de déterminer le pourcentage de fines dans le sable.

On met, dans une éprouvette à deux repères conçue spécialement, une solution lavante (vendue toute prête) jusqu'au premier repère. On ajoute alors une quantité de sable sec et on attend 10 minutes. Ensuite on agite l'éprouvette (à raison de 90 coups en 1 minute avec des battements de 30 cm) et on la remplit de solution lavante jusqu'au deuxième repère. Au bout de 20 minutes, le sable s'est déposé au fond et les fines forment une couche de « boue » par dessus. On mesure donc la hauteur totale (sable + fines) et la hauteur du sable propre, et on calcule le pourcentage que représente ce dernier. Ce pourcentage est appelé **équivalent sable** (E.S.).

Si on mesure la hauteur du sable propre avec une règle, on parle d'E.S.V. (E.S. à vue). Si on utilise un piston (plus précis), on parle d'E.S.

Pour des mortiers à la chaux, l'idéal est d'avoir un E.S. aux alentours de 75 %.

Là encore, si le sable ne correspond pas, il faut le compléter par un sable ayant des caractéristiques inverses.

Toutes ces données doivent être complétées par des expériences de mise en œuvre sur le chantier pour voir le comportement du mortier. Par exemple, même avec beaucoup de fines, s'il s'agit en majorité de sables très fins, on aura un mortier maigre.

V-3) But de l'essai

Cet essai a pour but de mesurer la propreté des sables entrant dans la composition des bétons. L'essai consiste à séparer les particules fines contenues dans le sol des éléments sableux plus grossiers, une procédure normalisée permet de définir un coefficient d'équivalent de sable qui quantifie la propreté du sable.

V-4) Principe de l'essai

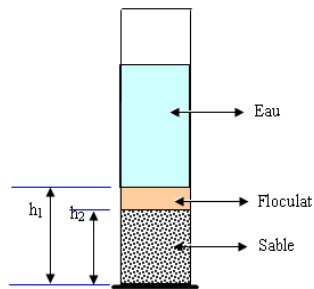
L'essai est effectué sur la fraction 0/5 mm du sable à étudier. On lave l'échantillon, selon un processus normalisé, et on laisse reposer le tout. Au bout de 20 minutes, on mesure les éléments suivants :

- hauteur h1 : sable propre + éléments fins,
- hauteur h2 : sable propre seulement.

L'essai est dit d'équivalent de sable - permet de déterminer le degré de propreté du sable :

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

Selon que la hauteur h₂ est mesurée visuellement ou à l'aide d'un piston, on détermine ESV (équivalent de sable visuel) ou ES (équivalent de sable au piston)

**V-6) Equipements utilisés :**

Les principaux éléments sont:

- Eprouvettes en plexiglas avec deux traits repères et leurs bouchons
- Entonnoir à large ouverture pour l'introduction du sable,
- Bonbonne de 5 litres pour la Solution lavante, le siphon et un tube souple de 1,50 m
- Tube laveur métallique plongeant,
- Tamis de 5mm d'ouverture de mailles avec fond
- Machine agitatrice,
- Réglet métallique pour la mesure des hauteurs du sable et floculat.
- Un piston taré à masse coulissante de 1 kg pour la mesure de ES.

a- Préparation des échantillons de sable.

- Faire passer l'échantillon par une passoire de 5 mm.
- Étuver l'échantillon et laisser 1% d'humidité.

b- Préparation de la solution lavante:

- 111g de chlorure de calcium.
- 480g de glycérine de qualité pharmaceutique.
- 120.13g de solution aqueuse à 4% en volume de formaldéhyde de qualité pharmaceutique.
- On ajoute l'eau distillée.

c- Mode opératoire :

On doit effectuer les opérations suivantes:

- 1 - La solution lavante est placée dans la bonbonne de 5 l située à 1 m au-dessus du fond des éprouvettes, le dispositif siphonique est amorcé et il est relié au tube laveur,
- 2- Pour l'étude on utilise deux éprouvettes propres et on fera la moyenne des résultats,
- 3- Remplir les éprouvettes avec la solution lavante jusqu'au premier trait,
- 4- Verser la quantité de sable voulue en veillant à éliminer les bulles (120g) dans le tube et laisser reposer pendant 10 minutes pour absorber l'eau.
- 5- Fermer les éprouvettes et les agiter: mouvement rectiligne et horizontal de 20 cm d'amplitude, à raison de 90 allers et retours en 30 mn (effectué automatiquement par une machine).
- 6- Laver et remplir les éprouvettes avec le tube laveur, Pour cela rincer les bouchons au-dessus des éprouvettes, faire descendre le tube laveur en le laissant tourner avec les doigts: on lave ainsi les

TP n°5 Equivalent de sable

parois intérieures. Laver le sable en faisant descendre et remonter lentement le tube laveur dans la masse du sable pour faire remonter les particules fines dans la solution supérieure.

7- Sortir le tube laveur (et fermer le robinet) , lorsque le niveau du liquide atteint le trait supérieur puis laisser reposer 20 mn en évitant toute vibration. La tolérance sur le temps de repos est faible (plus ou moins 10 s), car la hauteur du floculat dépend fortement de celui-ci. 8- Mesurer les hauteurs h_1 et h_2 . La mesure de h_2 n'est pas toujours aisée et l'équivalent de sable ESV qui en résulte n'est pas absolument juste. Ceci conduit à procéder de manière plus précise pour déterminer l'équivalent de sable ES, en utilisant la méthode de la mesure au piston.

9- Descendre lentement le piston taré dans le liquide à travers le floculat, le manchon prenant appui sur le bord supérieur de l'éprouvette et l'immobiliser au contact du sable, puis mesurer h'_2 .

-On refait la même expérience une autre fois.

V-7) Résultats :

Les résultats de l'essai sont donnés comme suit:

Les formules:

Équivalent de sable à vue Esv :

$$Esv = (h_2/h_1) \times 100\%.$$

Équivalent de sable avec le piston :

$$Esp \quad Es = (h'_2/h_1) \times 100\%.$$

h'_2 et h_2 : hauteur de sable propre.

h_1 : hauteur de sable propre + hauteur des imputées.

	Eprouvette 1	Eprouvette 2
h_1		
h_2		
h'_2		
Esv		
Es		
Moy Esv		
Moy. Es		

TEMPS DE PRISE***LES CIMENTS*****1. Définition:**

Le ciment est une poudre minérale qui forme avec l'eau une pâte faisant prise et durcissant progressivement même à l'abri de l'air et notamment sous l'eau. Cette poudre est constituée de sels minéraux anhydres instables en particulier des silicates et aluminates de chaux.

2. Composition :**La composition chimique :**

Le ciment chimiquement se compose d'éléments suivants :

Elément	Pourcentage (%)
Oxyde de calcium (CaO)	62 - 67
Silice (SiO_2)	19 - 25
Alumine (Al_2O_3)	02 - 09
Oxyde de fer (Fe_2O_3)	01 - 05
Oxyde de sodium+ Oxyde de potassium : (Na_2O + K_2O)	00 - 1.5

La composition minéralogique :

La composition chimique seule ne suffit pas à caractériser un ciment, il est en effet nécessaire de connaître les composés minéralogiques constitués lors de la cuisson à partir des éléments précédents. D'après « BOGUE », on admet que les principaux composés minéralogiques formés lors du refroidissement du clinker sont les suivants :

- Silicate tricalcique (3CaO SiO_2) ou C_3S .

- Silicate bi calcique (2CaO SiO_2) ou C_2S .
- Aluminate tricalcique ($3\text{CaO Al}_2\text{O}_3$) ou C_3A .
- Alumino-ferrite tétra calcique ($4\text{CaO Fe}_2\text{O}_3 \text{ Al}_2\text{O}_3$) ou C_4AF .

Pour un ciment portland, les composés minéralogiques sont compris dans les limites suivantes :

Constituants	C_3S	C_2S	C_3A	C_4AF
Pourcentages	50-75	7-30	0-16	0-20

Suivant les proportions de ces quatre composés minéralogique, les ciments auront des propriétés différentes c'est ainsi que :

- Le C_3S appelé également alite est le composé qui développera les résistances initiales du ciment.
- Le C_2S appelé le bélite est l'élément qui contribuera à développer les résistances à long terme.
- Le C_3A est le composé qui possède la prise la plus rapide, et la chaleur d'hydratation la plus élevée.
- Le C_4AF est l'élément minéralogique ne contribue pratiquement pas au développement des résistance.

3. Propriétés :

Finesse de mouture :

Elle est caractérisée par sa surface spécifique qui correspond à la surface développée par la totalité des grains contenus dans une masse donnée. Cette surface spécifique mesurée généralement au moyen du perméabilimètre de « Blaine » est exprimée en cm^2/g , ainsi plus le ciment est fin, et plus il développera de meilleures résistances, et plus le risque du retrait est accru.

Hydratation, prise et durcissement:

TP n°6 Temps de Prise

Au contact de l'eau, les sels minéraux amorphes anhydres et instables s'hydratent, il se produit ainsi la cristallisation qui conduit à la formation des cristaux en aiguilles qui conduisent à la prise. Le début de prise est le moment où on constate une augmentation brusque de viscosité de la pâte, ce début de prise est dans la plupart des cas entre 2 et 5 heures. La fin de prise correspond au moment où la pâte devient un bloc rigide.

Classe de ciment	35	45	45R	55	55R	HP
Début de prise	1h30	1h30	1h	1h	1h	1h
Expansion max	10mm pour toutes les classes					
compression (MPa)	mortier « prisme 4×4×16 »					
02j			15		22.5	30
28j	25 45	- 35-55	35-55	45-65	45-65	55

Expansion:

Mesuré au moyen de ce qu'on appelle les aiguilles de « Le Chatelier », elle permet de définir la tendance du ciment à l'expansion. L'expansion est un essai normalisé, elle se mesure à chaud et à froid et elle est exprimée en mm.

Résistances mécaniques:

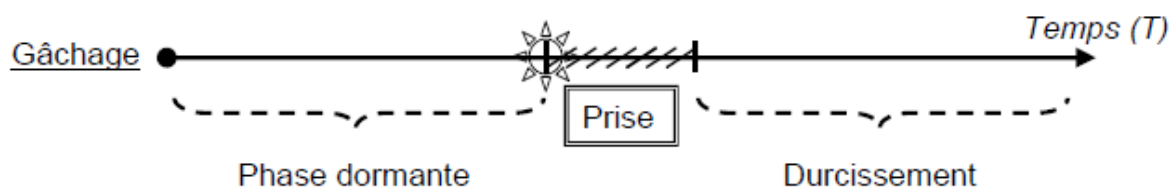
Il s'agit essentiellement de mesurer la résistance à la flexion et à la compression, les essais sont normalisés sur mortier 1/3, et les éprouvettes sont prismatiques de dimensions 4×4×16cm. Par ailleurs, c'est la résistance à la compression à 28j exprimée en MPa qui détermine la classe de résistance du ciment.

EXPERIMENTATION :

1. TEMPS DE PRISE DU CIMENT

a) Définition et but de l'essai :

La présence de régulateur de prise dans la masse des liants hydrauliques offre à ces derniers, après gâchage, une prise qui commence après quelques heures. Il est donc nécessaire de connaître le temps de début de prise des liants hydrauliques en vue de déterminer le temps disponible pour la mise en oeuvre in situ des mortiers et des bétons dont ils sont confectionnés. Les essais se font à l'aide de l'aiguille de Vicat qui donne deux repères pratiques : le début de prise et la fin de prise.



Principe.

L'essai consiste à suivre la transformation d'état d'un matériau visqueux, facile à travailler à l'état d'un matériau durci (plus difficile voire impossible à travailler).

Le temps de début de prise est déterminé à l'instant où l'aiguille de Vicat ($S = 1 \text{ mm}^2$, masse = 300 g) ne s'enfonce plus jusqu'au fond d'une pastille de pâte pure de ciment à consistance normalisée. En effet, pour chaque liant utilisé, il y'a une teneur en eau nécessaire qui donne à la pâte une consistance dite "normale". La détermination de cette teneur en eau est en fait un préalable à la mesure de la prise. L'appareil de Vicat est utilisé à la fois pour la détermination de la consistance normale ainsi qu'à la mesure du temps de début de prise.

1^{ère} Partie ESSAI DE CONSISTANCE (EN 196-3).

Matériel utilisé :

- Salle climatisée: L'essai doit se dérouler dans une salle, dont la température est de $20^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$ et dont l'humidité relative est supérieure à 90%. A défaut d'une telle humidité relative,

TP n°6 Temps de Prise

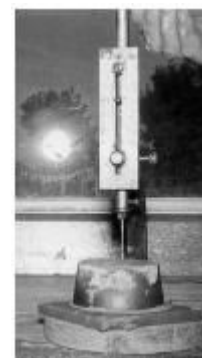
l'échantillon testé pourra, entre deux mesures, être entreposé dans de l'eau maintenue à $20^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$,

- Malaxeur normalisé : avec une cuve de 5 litres de contenance et d'une pale de malaxage pouvant tourner à 2 vitesses (dites lente 140 tr/mn et rapide 285 tr/mn),
- Appareil de VICAT (du nom de l'ingénieur français). L'appareil est composé d'un moule tronconique ($h=40\text{ mm}$ $d_1=70\text{ mm}$ et $d_2=80\text{ mm}$) et d'une tige coulissante équipée à son extrémité d'une sonde de $\Phi = 10\text{ mm}$,
- Balance précise à 0,1 g près,
- Chronomètre précise à 0,1 s près.

Mode opératoire :

On procède par tâtonnements :

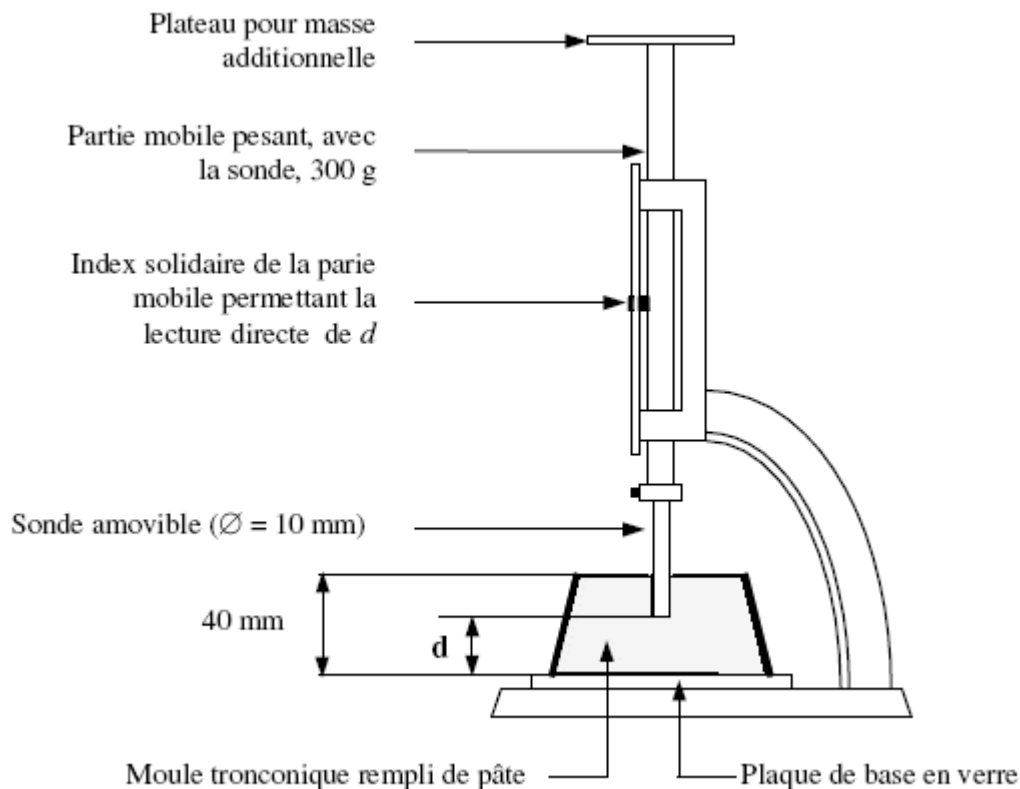
- préparer 0.5 kg de ciment, une pâte pure de rapport $E/C=0,26$.
- Verser l'eau dans la cuve du malaxeur contenant le ciment,
- Mettre le malaxeur en marche (voir le tableau qui suit pour la marche à suivre) et déclencher le chronomètre



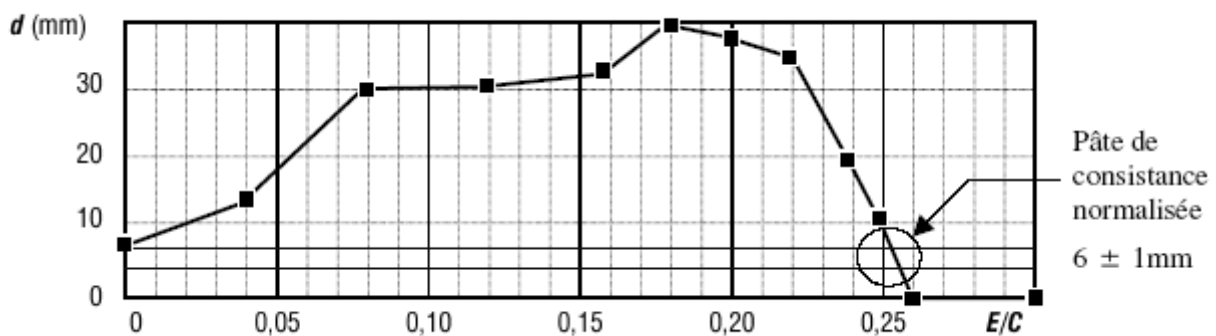
Opérations	Introduction du ciment	Introduction de l'eau	Mettre en route	Raclage de la cuve	Mettre en route
Durée des opérations		5 à 10 secondes	90 secondes	15 secondes	90 secondes
Etat du malaxeur	Arrêt		Vitesse lente	Arrêt	Vitesse lente

- la pâte est alors rapidement introduite dans le moule tronconique posé sur une plaque de verre, sans tassement ni vibration excessifs. Il faut enlever l'excès de pâte par un mouvement de va-et-vient effectué avec une truelle maintenue perpendiculairement à la surface supérieure du moule. Puis l'ensemble est placé sur la platine de l'appareil de Vicat.

TP n°6 Temps de Prise



- la sonde est amenée à la surface de l'échantillon et relâchée sans élan (sans vitesse). La sonde alors s'enfonce dans la pâte. Lorsqu'elle est immobilisée (ou après 30 s d'attente), relever la distance d séparant l'extrémité de l'aiguille de la plaque de base.
- la pâte sera à consistance normale si $d = 6\text{ mm} \pm 1\text{ mm}$: si $d > 7\text{ mm}$: il n'y a pas assez d'eau, si $d < 5\text{ mm}$: il y a trop d'eau. dans les 2 cas, jeter la pâte, nettoyer et sécher le matériel et recommencer avec une nouvelle W.



Evolution de la consistance d'une pate de ciment en fonction de E/C

2^{ème} Partie ESSAI DE PRISE (EN 196-3).**Matériel utilisé.**

C'est le même appareil qui est utilisé (dans les mêmes conditions) à l'exception de la sonde qui cisaille l'échantillon, le diamètre est beaucoup plus petit ($\Phi = 1.13 \text{ mm}$).

Mode opératoire.

une fois la pâte à consistance normale obtenu, on procède au changement de la sonde de vicat par l'aiguille de Vicat et on l'amène à la surface de l'échantillon et relâchée sans élan (sans vitesse). L'aiguille alors s'enfonce dans la pâte. Lorsqu'elle est immobilisée (ou après 30 s d'attente), relever la distance d séparant l'extrémité de l'aiguille de la plaque de base.

- recommencer l'opération à des intervalles de temps convenablement espacés ($\sim 10\text{-}15 \text{ mn}$) jusqu'à ce que $d = 4\text{mm} \pm 1\text{mm}$.
- cet instant mesuré à 5 mn près est le temps de début de prise pour le ciment testé.

Heure	Temps de prise	d
	5	
	10	
	15	

Remarque :

Il est recommandé de reporter les résultats obtenus sur un graphique (minimum 3 points) en vue de déterminer le temps de début de prise avec précision.

Bibliographie

- 1- Cours de Matériaux de construction, Ghomari, www.univ-tlemcen.dz/ghomari/mdc
- 2- Matériaux de construction 1 , J.P. Delisle, F. Alou, Lausanne , Octobre 1978.
- 3- Matériaux De Construction – V. Voroboiev – ed. Moscou
- 4- Matériaux De Construction - Emile Olivier –
- 5- Contrôle De Qualité Des Ouvrages De Genie Civil (OPU)
- 6- Matériaux Réfractaires et Céramique Technique- G.Aliprandi-
- 7- Traité De Géologie – A. DE L'APPARENT-
- 8- Komar A., Matériaux et éléments de construction, Edit. Mir, Moscou, Russie, 539 p.
- 9- Richards W. (1965), La science des matériaux de l'ingénieur, Dunod, paris, 543 p.,
- 10- L'école chez soi (1972), Matériaux de construction, Eyrolles, Paris, 571 p.,
- 11- Costes J. (1981), La plâtre traditionnel et moderne, Eyrolles, Paris, 71 p.,
- 12- Dreux G. (1981), Nouveau guide du béton, Eyrolles, Paris, 311 p.,
- 13- Chevalley E. (1982), Le bois : panneaux et matériaux, Delta et SPES, Lausanne, 133 p.,
- 14- Bernard E. (1978), La peinture et la vitrerie, Eyrolle, 227 p.,